



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO
APLICADA COMO REFORÇO SOB O EFEITO DE ELEVADAS
TEMPERATURAS**

Morgana Sleifer

Lajeado, novembro de 2017.

Morgana Sleifer

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO
APLICADA COMO REFORÇO SOB O EFEITO DE ELEVADAS
TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Ciências
Exatas e Tecnológicas da Universidade
do Vale do Taquari, UNIVATES, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Me. Débora Pedroso
Righi

Lajeado, novembro de 2017.

Morgana Sleifer

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO
APLICADA COMO REFORÇO SOB O EFEITO DE ELEVADAS
TEMPERATURAS**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Prof. Me. Débora Pedroso Righi - Orientadora
Universidade do Vale do Taquari

Me. Fernanda Bianchi Pereira da Costa
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Me. Rafael Mascolo
Universidade do Vale do Taquari

Lajeado, novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades que me foram dadas, por todas as pessoas que cruzaram meu caminho, pelas experiências que vivi e por todas as conquistas que já alcancei.

Agradeço a minha família, que sempre me apoiou e me ajudou a enfrentar as dificuldades, em especial a meu pai, Claudio Roque Sleifer, e minha mãe, Lourdes Maria Sleifer, por todo o amor incondicional.

Agradeço ao Marcos, pela convivência, paciência e incentivo durante toda esta jornada.

Agradeço a todos os professores que me transmitiram conhecimentos e contribuíram para a minha formação acadêmica, principalmente à minha orientadora Débora Pedroso Righi, por toda a dedicação, orientação e confiança.

Agradeço aos meus amigos, que ao longo da graduação, me proporcionaram conhecimentos e crescimento pessoal, principalmente ao meu amigo Junior e a minha amiga Mônica que me ajudaram e me incentivaram na realização deste trabalho.

RESUMO

Nos últimos tempos, a crescente necessidade de reforçar e reabilitar estruturas de concreto tem motivado o desenvolvimento de novas técnicas nesta área. Dentre essas técnicas, os polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) tem-se mostrado uma alternativa de reforço estrutural, com intuito de aumentar a resistência de estruturas de concreto. Entretanto, o desempenho do sistema CFRP em elevadas temperaturas, como em situação de incêndio, é uma questão que merece atenção, tendo em vista que a resina epóxi, material utilizado para aderir a fibra de carbono à estrutura de concreto, perde sua eficiência com o aumento de temperatura. Este trabalho visa avaliar a resistência à flexão a 4 pontos de estruturas de concreto reforçada com fibra de carbono, quando submetidos a elevadas temperaturas. O programa experimental compreende a execução de um traço de concreto nas proporções 1:2,92:3,08 a/c: 0,55 e 0,5% de aditivo, e a moldagem de 12 corpos de prova prismáticos nas dimensões 15x15x50 cm. Foram realizados dois tipos de reforços, um na face inferior dos corpos de prova prismáticos e outro nas faces laterais dos mesmos. Aos 35 dias os corpos de prova foram submetidos a elevadas temperaturas nos patamares de 80°C à 240°C em tempos de exposição de 30 à 120 minutos, escolhidos conforme a taxa de aquecimento de incêndio. Após o aquecimento, os corpos de prova foram submetidos à flexão a 4 pontos. Os resultados demonstram que os corpos de prova reforçados apresentam maior valor de resistência à flexão quando comparados a elementos sem reforço, em todas as temperaturas analisadas. Ainda os elementos com reforço na face inferior apresentam melhores resistências quando comparados a elementos com reforço nas laterais.

Palavras-Chave: Reforço estrutural. Fibra de carbono. Resina epóxi. Elevadas temperaturas.

ABSTRACT

In the last times, the growing need to reinforce and rehabilitate concrete structures has motivated the development of new techniques in this area. Among these techniques, carbon fiber reinforced polymers (CFRP) have been shown to be an alternative structural reinforcement in order to increase the strength of concrete structures. However, the performance of the CFRP system at high temperatures, as in a fire situation, is a matter that deserves attention, being that epoxy resin, a material used to adhere the carbon fiber to the concrete structure, loses its efficiency with the temperature increase. This work aims to evaluate the flexural strength at 4 points of reinforced concrete structures with carbon fiber, when submitted to high temperatures. The experimental program comprises the execution of a concrete trace in proportions 1:2,92:3,08 a/c: 0,55 and 0,5% of additive, and the molding of 12 prismatic proof bodies in dimensions 15x15x50cm. Two types of reinforcements were made, one on the underside of the prismatic proof bodies and one on the lateral faces of the prismatic proof bodies. At 35 days, the proof bodies were submitted to high temperatures of 80°C to 240°C at exposure times of 30 to 120 minutes, chosen according to the rate of fire heating. After heating, the proof bodies were submitted to flexion at 4 points. The results demonstrate that the reinforced proof bodies have a higher resistance value when compared with unreinforced elements, at all temperatures analyzed. Even the elements with reinforcement on the underside present better resistances when compared to reinforced elements in the sides.

Keywords: Structural reinforcement. Carbon fiber. Epoxy resin. High temperatures.

A persistência é o caminho do êxito.
Charles Chaplin

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de reforço com chapas pultrudadas	21
Figura 2 - Sistema de reforço com fios enrolados sob tensão.....	21
Figura 3 - Sistema de reforço com tecidos pré-impregnados de fibra de carbono	22
Figura 4: Reforços à flexão e ao corte com chapas metálicas	24
Figura 5 - Reforços à flexão, ao corte e ao confinamento com novos materiais.	24
Figura 6 - Esquema da técnica de reforço	27
Figura 7 - Configuração de reforço ao cisalhamento.....	29
Figura 8 - Modos de ruptura	32
Figura 9 – Curva temperatura - tempo de um incêndio real	35
Figura 10 – Modelo de incêndio padrão	36
Figura 11: Fluxograma para o programa experimental	43
Figura 12 - Tecido de fibra de carbono	48
Figura 13 - Endurecedor e resina epóxi	48
Figura 14 - Processo de confecção dos corpos de prova: (a) mistura dos materiais; (b) abatimento do concreto; (c) preenchimento do molde; (d) adensamento; (e) identificação; (f) cura em câmara úmida dos corpos de prova	51
Figura 15 – Sequência de aplicação do reforço	53
Figura 16 - Reforço aplicado na face inferior.....	54
Figura 17 - Reforço aplicado nas faces laterais	54
Figura 18 - Aplicação da proteção passiva	55
Figura 19 - Mufla para realização dos ensaios.....	56
Figura 20 - Ensaio de flexão a 4 pontos.....	57
Figura 21 – Ilustração do ensaio de flexão a 4 pontos	57
Figura 22 - Corpos de prova sem reforço (a) 80°C; (b) 160°C; (c) 240°C	63
Figura 23 - Rompimento do corpo de prova reforçado na face inferior	66
Figura 24 - Rompimento à flexão	68
Figura 25 - Rompimento do corpo de prova com descolamento do reforço	69

Figura 26 - Rompimento do corpo de prova com descolamento do reforço	69
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos em diferentes temperaturas dos corpos de prova sem e com CFRP.....	59
Gráfico 2 - Relação da resistência à flexão a 4 pontos e a temperatura de exposição dos corpos de prova sem CFRP	62
Gráfico 3 - Relação da resistência à flexão a 4 pontos e a temperatura de exposição dos corpos de prova reforçados com CFRP na face inferior	65
Gráfico 4 - Relação da resistência à flexão a 4 pontos e a temperatura de exposição dos corpos de prova reforçados com CFRP nas faces laterais.....	67
Gráfico 5 - Análise da resistência a flexão dos corpos de prova com e sem CFRP ..	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Modos de ruptura	31
Quadro 2 - Metodologia de execução do reforço	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos principais tipos de fibra.....	20
Tabela 2 - Propriedades mecânicas da fibra de carbono para reforço estrutural	28
Tabela 3 - Características técnicas de tecidos de fibra de carbono	28
Tabela 4 - Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)	38
Tabela 5 – Modificações do concreto em altas temperaturas	39
Tabela 6 - Características físicas do cimento.....	44
Tabela 7 - Resultados de caracterização da brita 1	45
Tabela 8 - Resultados da caracterização da areia média	46
Tabela 9 - Características técnicas do aditivo	47
Tabela 10 - Propriedades dos tecidos de fibra de carbono	47
Tabela 11 - Características e composições da resina.....	49
Tabela 12 - Traço do concreto	50
Tabela 13 - Resultados dos corpos de prova sem reforço	61
Tabela 14 – Resultados dos corpos de prova reforçados na face inferior.....	64
Tabela 15 - Resultados dos corpos de prova reforçados nas faces laterais	66
Tabela 16 - Incrementos	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a/c	Água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto Americano de Concreto
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymers (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono)
cm	Centímetro
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CP	Corpo de Prova
FRP	Fiber Reinforced Polymers (Polímeros Reforçados com Fibras)
g	Gramas
GPa	Gigapascal
kN	Quilonewton
kW	Quilowatt
m ³	Metro cúbico
min	Minuto
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
T _g	Temperatura de transição vítrea
°C	Grau Celsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Contextualização	13
1.2. Justificativa	14
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo geral	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. Delimitações	16
1.5. Organização do trabalho	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Concreto reforçado com fibras	18
2.1.1. Reforço com tecido de fibra de carbono	22
2.1.2. Propriedades dos tecidos de fibra de carbono	24
2.1.3. Propriedades do adesivo epóxi	25
2.1.4. Propriedades dos compósitos	26
2.1.5. Tipos de reforço	28
2.1.6. Modos de ruptura	30
2.1.7. Limitações da técnica	32
2.2. Concretos submetidos às elevadas temperaturas	33
2.2.1. Elementos do fogo	33
2.2.2. Origem e dinâmica dos incêndios	34
2.2.3. Consequência dos incêndios em edificações	36
2.2.4. Consequência dos incêndios nos concretos	38
2.3. Concretos reforçados com fibras de carbono submetidos às elevadas temperaturas	40

2.3.1. Medidas de proteção ao fogo no FRP	41
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
3.1. Materiais.....	44
3.1.1. Cimento Portland.....	44
3.1.2. Água de amassamento	45
3.1.3. Agregado graúdo.....	45
3.1.4. Agregado miúdo	46
3.1.5. Aditivo superplastificante.....	47
3.1.6. Fibra de carbono	47
3.1.7. Resina epoxídica	48
3.2. Dosagem	49
3.2.1. Controle Tecnológico.....	51
3.3. Execução do reforço	51
3.4. Execução da proteção passiva	54
3.5. Exposição às elevadas temperaturas.....	56
3.6. Determinação da resistência à flexão	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1. Avaliação da resistência à flexão a quatro pontos	58
4.1.1. Avaliação de resistência do corpo de prova referência.....	60
4.1.2. Avaliação de resistência do corpo de prova reforçado na face inferior...	63
4.1.3. Avaliação de resistência do corpo de prova reforçado nas faces laterais	66
4.1.4. Comparação entre os dois tipos de reforços utilizados	70
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Desde os primórdios da civilização, o homem se preocupa com a construção de estruturas que se adapte conforme as suas necessidades, sejam elas habitacionais, laborais ou de infraestrutura (SOUZA E RIPPER, 2009). Segundo Helene e Braga (2005), o concreto tem demonstrado ser o material mais adequado para a construção, resistindo às mais variadas sobrecargas e ações do meio ambiente e superando as demais alternativas construtivas, como madeira e aço e alvenaria. Atualmente, o concreto é o material mais utilizado na construção civil, sendo constituído basicamente da mistura de cimento Portland, areia, brita e água (METHA E MONTEIRO, 2014).

Apesar do concreto ser considerado um material de grande utilização e uma vida útil elevada, as construções podem apresentar intensas e significativas manifestações patológicas (HELENE E BRAGA, 2005). Banduk (2008) cita que os problemas patológicos nas edificações são decorrentes de falhas desenvolvidas durante a fase de concepção, execução e aquisição dos materiais ou utilização. Além do comprometimento estético, pode ocorrer a redução da capacidade resistente, podendo ocasionar o colapso parcial ou total da estrutura (HELENE E BRAGA, 2005).

Conforme os autores Helene e Braga (2005), as medidas terapêuticas incluem os reparos, as recuperações e os reforços. Os reparos são aplicados quando ocorre a degradação do componente estrutural, as recuperações são empregadas para restabelecer a capacidade resistente original do elemento

estrutural e os reforços são executados para aumentar a capacidade portante da estrutura.

Segundo Harper (2004), um evento excepcional que pode ocorrer nas edificações é o incêndio, causando consequências graves. Submetidos à ação do fogo, os materiais da construção tendem a amolecer, fundir-se, decompor-se ou carbonizar-se. Além destes efeitos, os materiais podem entrar em combustão, produzir calor, propagar chamas, gerar fumaças e até substâncias tóxicas.

Nos países desenvolvidos e emergentes, os incêndios em edificações tem sido motivo de preocupação, provocando vítimas e prejuízos financeiros. Os elementos construtivos resistentes à ação do fogo têm a finalidade de dar maior segurança às pessoas, retardar o colapso parcial ou total da edificação e restringir o incêndio junto ao local onde teve início, sem proporcionar perigo aos ambientes próximos e edificações vizinhas (MARCELLI, 2007).

Para Bertolini (2014), um elemento resistente ao fogo mantém a estabilidade, a capacidade portante ou a vedação e o isolamento térmico, por um determinado tempo durante um incêndio. Para garantir a resistência mecânica e evitar o colapso da construção, pode-se fazer uso de reforços estruturais, que aumentam a resistência da estrutura existente.

A técnica com revestimento externo utilizando mantas de materiais compostos com matriz polimérica é o tipo de reforço mais difundido. Dentre os materiais compostos, os mais utilizados são os materiais poliméricos reforçados com fibras longas, como as fibras de carbono (BERTOLINI, 2014). Com o intuito de prever o comportamento dos reforços em situação de incêndio, o presente trabalho visa analisar a resistência dos reforços com compósitos de fibra de carbono e adesivo epóxi em estruturas de concreto submetidas a elevadas temperaturas.

1.2. Justificativa

Nos últimos anos, a crescente necessidade de reforço e reabilitação das estruturas de concreto têm exigido que a engenharia estrutural desenvolva novos

procedimentos e técnicas eficientes nesta área. Dentre essas técnicas, os polímeros reforçados com fibras (PRF) tornaram-se uma alternativa de reforço estrutural, sendo que a fibra mais apropriada é a fibra de carbono, por apresentar maior resistência e rigidez em relação as demais fibras. Entretanto, o desempenho destes sistemas em situação de incêndio gera uma grande preocupação, pelo fato de seu comportamento não ter sido completamente descrito e avaliado (LIMA, 2001; OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Desta maneira, a avaliação dos principais efeitos da exposição à altas temperaturas em estruturas de concreto reforçadas externamente com fibra de carbono, além da análise das degradações e das mudanças nas propriedades mecânicas do compósito, justificam o presente trabalho.

1.3. Objetivos

Neste item são apresentados os objetivos do trabalho, subdivididos em objetivo geral, destacando o foco principal da pesquisa, e objetivos específicos, mostrando cada ponto que se deseja enfatizar com o estudo.

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é a avaliação da degradação da fibra de carbono impregnada com adesivo epóxi quando aplicada como reforço em diferentes patamares de temperatura.

1.3.2. Objetivos específicos

Para atingir com êxito o objetivo geral desta pesquisa, pressupõe-se alcançar os seguintes objetivos:

- Avaliar o efeito dos reforços quando aplicados separadamente nas faces inferiores e nas faces laterais;
- Avaliar a resistência do reforço na flexão durante a exposição de diferentes temperaturas;
- Avaliar a degradação do reforço durante a exposição de diferentes temperaturas.

1.4. Delimitações

O presente estudo fomenta o entendimento sobre o comportamento dos reforços com tecidos de fibra de carbono quando submetidos às elevadas temperaturas, utilizando um único traço de concreto, bem como materiais específicos. Quanto à execução do reforço, foi utilizado um único tipo de resina, sendo esta recomendada pelo fabricante da fibra de carbono.

Outro fator a ser considerado é a forma de exposição dos corpos de prova ao calor, no qual foi utilizado fornos com baixa capacidade e elétrico, devido à complexidade da simulação de um incêndio em condições reais e a infraestrutura laboratorial disponível.

Junto a estas condicionantes, destaca-se que os resultados obtidos dos ensaios de flexão são pertinentes apenas à resistência da fibra de carbono quando exposta à elevadas temperaturas.

1.5. Organização do trabalho

A pesquisa é dividida em duas etapas distintas. A primeira parte engloba os capítulos de 1 a 2, que tratam da fundamentação teórica, introduzindo o problema a ser investigado, as técnicas de reforço com fibra de carbono e os efeitos da ação do fogo sobre estruturas com e sem reforço. A segunda parte abrange os capítulos de 3 a 5, que apresenta o programa experimental, os resultados e discussões e a conclusão.

Capítulo 01 – Introduz o assunto abordado, justifica o seu estudo e define os objetivos e delimitações.

Capítulo 02 – Fundamenta teoricamente sobre os concretos reforçados com fibras de carbono, os materiais utilizados na técnica de reforço, bem como suas respectivas propriedades, as vantagens, desvantagens e limitações do reforço. Também é feita uma breve introdução sobre o processo e dinâmica do fogo e as consequências da exposição à elevadas temperaturas para edificações, para o concreto e, principalmente, para reforços com fibra de carbono.

Capítulo 03 – Trata do programa experimental desenvolvido, caracterizando os materiais utilizados, a técnica de aplicação do reforço, a exposição às elevadas temperaturas dos corpos de prova e os ensaios realizados.

Capítulo 04 – Apresenta os resultados dos ensaios de resistência à flexão a 4 pontos dos corpos de prova com e sem reforço, submetidos a diferentes temperaturas.

Capítulo 05 – Consta as considerações finais do presente trabalho, considerando o objetivo do mesmo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Reforço estrutural com fibra em concretos

Nas últimas décadas, o interesse em reforçar externamente as estruturas de concreto tem aumentado significativamente, resultando em usos de aplicações de reforço e reparação (DEHN *et al.*, 2016). Muitas das edificações construídas podem ser consideradas deficientes na questão de segurança estrutural, devido aos efeitos acumulados da má execução ou emprego de materiais inapropriados, deteriorações causadas pelo ambiente, terremotos e recalques das fundações (TRANTAFILLOU, 1997).

Segundo Campagnolo *et al.* (1999), aliado a estes fatores, a alteração da destinação do uso e a necessidade de adequação às normas, que cada vez se tornam mais rígidas, resultam em estruturas que requerem a sua capacidade de carga restabelecida ou majorada. Para sanar esses problemas, pode ser necessária a recuperação das estruturas que assegurem a segurança, fato que pode ser alcançado com execução de reforços estruturais.

Souza e Ripper (2009), citam que a necessidade de reforços em estruturas de concreto é decorrente a vários motivos, dentre os quais destacam-se:

- a) Correção de falhas de projeto ou de execução;
- b) Aumento da capacidade portante da estrutura, a fim de permitir modificações da destinação e uso da edificação;

- c) Reestruturação da capacidade portante da estrutura diminuída em virtude de acidentes (choques, incêndios, etc), do desgaste natural ou da deterioração.
- d) Modificação da concepção estrutural, como por exemplo, o corte de uma viga por necessidade arquitetônica ou de utilização.

Os reforços estruturais tornaram-se uma alternativa para a reabilitação de estruturas com manifestações patológicas, evitando demolições desnecessárias e reduzindo o custo final do serviço. No entanto, o reforço estrutural é um sistema complexo, no qual o elemento estrutural e o material utilizado para o reforço devem funcionar como um elemento único, como um sistema integrado (EMMONS *et al*, 1998a).

Conforme Emmons (1994), a reparação do concreto é um processo que apresenta desafios únicos, devendo integrar novos materiais com materiais velhos para formar um composto capaz de resistir às exposições de uso, do ambiente e do tempo. O autor ainda cita que para aumentar a capacidade portante e/ou a ductilidade de estruturas de concreto armado, várias técnicas de reforço estão sendo utilizadas. O reforço pode ser aplicado na parte interna ou na parte externa, conforme sua modalidade escolhida. A aplicação na parte interna é extremamente invasiva, onerosa e de difícil execução. Já a aplicação na parte externa é menos invasiva, pois compreende a fixação do reforço na superfície externa do elemento estrutural.

Usualmente, as técnicas mais utilizadas são a adição de uma nova armadura ao elemento danificado e subsequente concretagem, a colagem de chapas de aço ou a colagem de compósitos poliméricos estruturais (ROBERY e INNES, 1997). Segundo Bertolini (2014), o material mais utilizado para reforço de estruturas são os polímeros reforçados com fibra (PRF) ou *Fiber Reinforced Polymers* (FRP).

Os PRF são constituídos por dois componentes, um estrutural (fibras de alta resistência) e o outro matricial (resina polimérica). A eficiência estrutural dos materiais compósitos varia conforme a quantidade e o tipo de fibras empregado em uma determinada direção.

De modo geral, estes reforços são classificados conforme o tipo da fibra e a metodologia de fixação. No composto destinado a reforço estrutural, as fibras longas (contínuas) são as mais apropriadas, sendo atualmente as mais empregadas as fibras de vidro, carbono e aramida. A Tabela 1 mostra as principais propriedades das fibras (BERTOLINI, 2014; SALLABERRY, 2005).

Tabela 1 - Propriedades dos principais tipos de fibra

Tipos de fibras	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação última (%)
Carbono de alta resistência	215 - 235	3500 - 4800	1,4 - 2,0
Carbono de ultra alta resistência	216 - 235	3500 - 6000	1,5 - 2,3
Carbono de alto módulo de elasticidade	350 - 500	2500 - 3100	0,5 - 0,9
Carbono de ultra alto módulo de elasticidade	500 - 700	2100 - 2400	0,2 - 0,4
Vidro - aluminoborosilicato de cálcio (E)	70	1900 - 3000	3,0 - 4,5
Vidro - aluminoborosilicato de magnésio (S)	85 - 90	3500 - 4800	4,5 - 5,5
Aramida com baixo módulo de elasticidade	70 - 80	3500 - 4100	4,3 - 5,0
Aramida com alto módulo de elasticidade	115 - 130	3500 - 4000	2,5 - 3,5

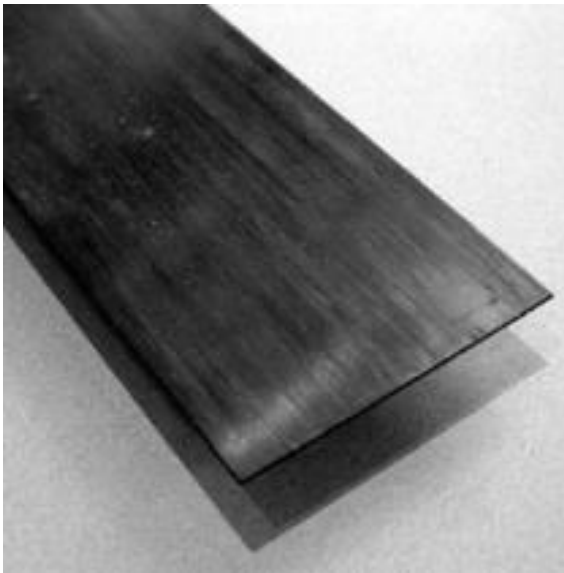
Fonte: Adaptado de CEB-FIP (2001).

As fibras de carbono são as mais resistentes e rígidas dentre as fibras utilizadas para reforço estrutural. O compósito de fibra de carbono embutido em uma matriz epóxi foi uma grande descoberta para a engenharia civil, sendo utilizado, principalmente, na aplicação de reforços externos (DEHN *et al*, 2016; SALLABERRY, 2005).

Existem atualmente três sistemas de reforço com este tipo de material, os quais estão apresentados abaixo, conforme (ROBERY e INNES, 1997):

- Reforço com chapas pultrudadas¹: são chapas de fibra de carbono fixadas com adesivo epóxi, apresentando elevada resistência. O reforço é feito por meio da colagem das mesmas na superfície do elemento estrutural (Figura 1);

Figura 1: Sistema de reforço com chapas pultrudadas



Fonte: Lima (2001).

- Reforço com fios enrolados sob tensão: são filamentos de fibra de carbono colados na superfície do elemento estrutural ou enrolados a seco e, posteriormente, curados a quente (Figura 2);

Figura 2 - Sistema de reforço com fios enrolados sob tensão.

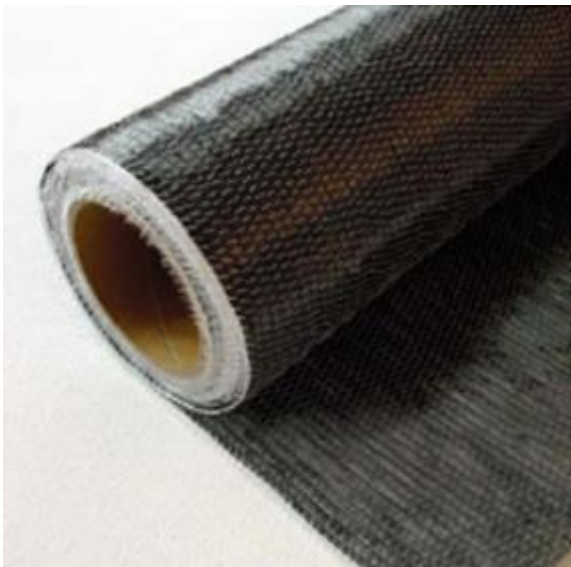


Fonte: Higuero (2010)

¹ Pultrudada deriva do processo de pultrusão, que fabrica perfis, chapas e reforços flexíveis. O processo de fabricação consiste em puxar as fibras impregnadas com resina por meio de um molde de aço pré-aquecido utilizando um dispositivo de contínuo tracionamento.”

- Reforço com tecidos pré-impregnados: são filamentos de fibra de carbono previamente alinhados e agrupados em forma de um tecido. Os reforços são fixados na superfície do elemento estrutural com adesivo epóxi (Figura 3).

Figura 3 - Sistema de reforço com tecidos pré-impregnados de fibra de carbono



Fonte: Lima (2001)

2.1.1. Reforço com tecido de fibra de carbono

Segundo Souza e Ripper (2009), o uso de compósitos de fibra de carbono (CFRP) em reforços de estruturas de concreto armado surgiu no distrito de Kanto, na cidade de Tóquio. Entidades tanto públicas quanto privadas japonesas investigaram novas tecnologias para reforço com o intuito de preparar as construções existentes, em particular as estruturas do sistema viário, devido às constantes ameaças de sismos.

As fibras de carbono foram desenvolvidas por apresentar alta resistência e rigidez (ACI 544.1R, 1996). Para Higuero (2010), as elevadas propriedades mecânicas da fibra de carbono são decorrentes do elevado grau de orientação cristalina ao longo do eixo da fibra.

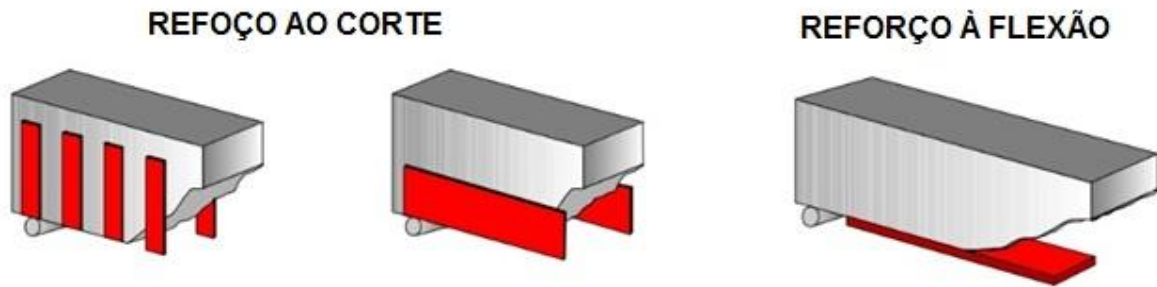
Em comparação às demais fibras, a fibra de carbono é mais cara e seu desenvolvimento comercial é limitado (ACI 544.1R, 1996). Para Higuero (2010), o elevado custo deve-se ao processo de produção e ao uso de materiais termoestáveis. Por ser um polímero sintético, a fibra de carbono requer um longo e caro processo de produção. Este processo é realizado à altas temperaturas, sob uma atmosfera de hidrogênio durante semanas ou mesmo meses dependendo da qualidade para ser obtida. O uso de materiais termoestáveis é necessário no processo de criação da peça final, no qual utiliza-se um conjunto complexo de ferramentas especializadas, tal como forno autoclave.

Juvandes (1999) cita que no âmbito da construção civil internacional, os compósitos de FRP do tipo manta ou tecido flexível (com resina pré-impregnada) são um dos mais estudados e aconselháveis para as técnicas de reforço por colagem exterior ao longo da superfície dos elementos de concreto mais tracionados.

Com o intuito de aumentar a ductilidade e/ou a resistência das estruturas, pode ser utilizado folhas flexíveis pré-impregnadas. Este material é constituído por feixes de filamentos de fibra de carbono agrupados de forma contínua, ordenados numa única direção e aderidos a uma folha de suporte que contém uma pequena quantidade de resina epóxi. O material combinado assume espessuras da ordem de décimos de milímetros e tem o aspecto de um tecido, permitindo o seu manuseio de forma adequada (SOUZA E RIPPER, 2009).

Além das formas usadas nos esforços à flexão e ao corte com chapas metálicas (Figura 4), os novos materiais, que utilizam compósitos de FRP, potencializam outras formas de aplicação (Figura 5), isso porque são mais flexíveis e abrangentes (JUVANDES, 1999).

Figura 4: Reforços à flexão e ao corte com chapas metálicas



Fonte: Adaptado de Juvandes (1999).

Figura 5 - Reforços à flexão, ao corte e ao confinamento com compósitos de FRP.



Fonte: Adaptado de Juvandes (1999)

2.1.2. Propriedades dos tecidos de fibra de carbono

A fibra de carbono é utilizada em reforços estruturais devido às suas propriedades, tais como elevada resistência à tração, baixo peso específico, boa durabilidade, resistência à ataques químicos e suscetibilidade nula à corrosão (TRIAFILLIOU, 1997).

Normalmente, os tecidos à base de fibra de carbono possuem entre 95 e 98% das fibras no sentido longitudinal e entre 2% e 5% na direção transversal, para efetuar a costura e evitar o desgaste longitudinal. Apresentam uma espessura de entre 0,13 e 0,30 milímetros, pesando entre 200 e 800 g/m³ (HIGUERO, 2010).

Os sistemas que utilizam fibra de carbono como elemento resistente apresentam elevada resistência e rigidez, massa específica reduzida, resistência à

fadiga, baixo coeficiente de dilatação térmica, resistência contra ataques químicos e corrosão e facilidade e rapidez de aplicação.

A utilização de fibra de carbono permite ser alcançadas grandes resistência e rigidez, podendo variar sua resistência entre 1500 e 5000 MPa. Quando comparada à fadiga de outros metais e compósitos, esta fibra apresenta maior resistência. O coeficiente de expansão térmica não depende apenas da fibra de carbono, pois este decorre de uma série de fatores, tipo de matriz, fração volumétrica e geometria da fibra (BEBER, 2003).

Conforme citado por Beber (2003), as fibras de carbono possuem menor condutividade térmica, quando comparadas ao aço. O tempo de operação da fibra se torna maior quando comparado a reforço com chapas de aço colada, pois tem resistência à ação de elevadas temperaturas, assim dependendo fundamentalmente da resina. Considerando individualmente a fibra de carbono, esta é capaz de manter suas propriedades mecânicas de resistência até 1000°C.

Em um estudo realizado por Meier (1997), onde realizou duas vigas com diferentes reforços, sendo um com chapa de aço colada e outro com fibra de carbono, em um grande forno horizontal, onde este foi aquecido até 650°C. O desprendimento das chapas ocorreu em um tempo muito menor comparado a fibra de carbono. Isto ocorreu pela baixa condutividade da fibra de carbono.

2.1.3. Propriedades do adesivo epóxi

De acordo com Souza e Ripper (2009), os adesivos são usados para colar materiais em elementos estruturais já construídos, podendo ser à base de epóxi, PVA ou acrílico. Segundo Juvandes (1999), para o desempenho eficaz de um reforço exterior, o adesivo tem papel fundamental, repercutindo nas suas propriedades em função das resistências mecânica e química, da elasticidade e da durabilidade desejadas para a ligação, como também do seu comportamento nas interfaces de ligação adesivo-concreto e adesivo-compósito de CFRP.

Higuero (2010) cita que em reforços, a resina epóxi é a mais indicada devido à alta aderência sobre materiais de concreto, à estabilidade dimensional, ao endurecimento rápido e irreversível, à resistência ao ataque químico e à elevada resistência mecânica. Esta resina serve para manter o tecido colado ao substrato, além de formar uma película protetora entre as fibras e o ambiente, que protege as mesmas contra umidade, oxidação, abrasão e agentes agressivos de natureza química e biológica. Ainda, o adesivo é responsável pelas propriedades térmicas e químicas do compósito (JANG, 1996; BEBER, 1999).

Os adesivos de base epóxi são polímeros disponibilizados em dois componentes: monômetro e catalisador. A junção dos dois componentes torna uma mistura viscosa, durante um certo tempo, e depois endurece e se solidifica, adquirindo elevada resistência mecânica (SOUZA E RIPPER, 2009). Após o processo de cura, este adesivo deve possuir resistência e dureza adequada para transferir o esforço de corte existente entre o concreto e o tecido de fibra de carbono e ser suficientemente plástico para evitar a ruptura frágil nesta interface (BARTON, 1997; BEBER, 1999).

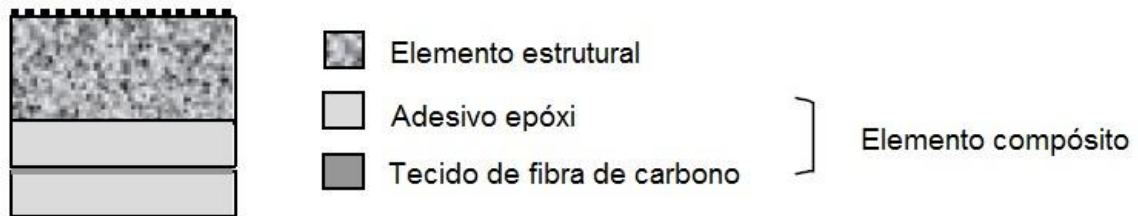
Na formação do elemento compósito em reforços com tecidos de fibra de carbono, o adesivo epóxi apresenta uma desvantagem em relação à exposição a elevadas temperaturas, visto que os mesmos são formados por átomos de carbono, nitrogênio e hidrogênio - materiais orgânicos e extremamente inflamáveis (HOLLOWAY, 1993). Além disso, Helene e Braga (2005) apontam que os adesivos de bases epóxi tem o inconveniente de exigirem o substrato seco, o que nem sempre é possível em obras.

2.1.4. Propriedades dos compósitos

Compósito é a combinação de duas ou mais fases constituintes que interagem funcionando como um único elemento, conforme Figura 6. No caso dos reforços estruturais, uma das fases é a fibra de carbono, que absorve as tensões impostas ao reforço, e a outra é o adesivo, que mantém as fibras orientadas e

aderidas ao substrato, bem como evita a abrasão entre as mesmas durante os ciclos de carregamento (JANG, 1996).

Figura 6 - Esquema da técnica de reforço



Fonte: Lima (2001)

De acordo com Lima (2001), as propriedades do tecido e do adesivo são fatores determinantes para as propriedades dos compósitos, bem como a proporção de cada um deles e a disposição dos feixes de fibra. Assim, as propriedades e características intrínsecas de cada componente são determinantes para as propriedades dos compósitos.

Na formação de um compósito, o tecido de fibra de carbono e o adesivo epóxi relacionam-se de modo que formam uma combinação na qual as tensões são redistribuídas em todos os fios, aumentando a sua eficiência. Esta distribuição de tensões está condicionada a natureza e a eficiência da aderência entre os elementos. (CAMPAGNOLO *et al.*, 1999).

Conforme Souza e Ripper (2009), os compósitos de fibra de carbono são utilizados para aumentar a capacidade resistente das peças, quanto à flexão, principalmente em lajes e vigas, e quanto ao esforço transversal, principalmente em pilares. Em comparação com o aço, estes compósitos apresentam um quarto do peso e resistem oito a dez vezes mais à tração, para o mesmo módulo de elasticidade. A ruptura é caracterizada por um comportamento frágil, no qual a curva comportamental até a ruptura é linear, sendo as tensões últimas da ordem dos 3.500 MPa, para correspondentes alongamento de 1,5%.

Os polímeros reforçados com fibra de carbono, conhecido como CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) podem ser classificados pelo módulo de elasticidade (HM), pela resistência a tração (HT) e pelo módulo ultra-alto (UHM)

(BERTOLINI, 2014). As características mecânicas são os listados abaixo na Tabela 2 e as características técnicas podem ser verificadas na Tabela 3.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas da fibra de carbono para reforço estrutural

Material	Densidade (g/cm³)	Módulo de elasticidade (Gpa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento por ruptura (%)	Absorção de umidade (%)
Fibra de carbono de alta resistência (HT)	1,78	270	3.400	1,4	0,1
Fibra de carbono de alto módulo (HM)	1,83	530	2.250	0,5	0,1
Fibra de carbono de módulo ultra-alto (UHM)	-	640	1.900	0,3	-

Fonte: Adaptado de Bertolini (2014).

Tabela 3 - Características técnicas de tecidos de fibra de carbono

Tipo de fibra de carbono	HT	HM	UHM
Largura do tecido (cm)	10 – 100	5 -5 0	50
Gramatura (g/cm ²)	230-1.200	300	-
Espessura equivalente (mm)	0,165-0,67	0,16	0,143
Área resistente (mm ² /m)	130-670	160	143
Resistência à tração (MPa)	>3.400/>4.800	3.000	>1.900
Carga por unidade de largura (kN/m)	630-2.520	480-500	>2.700
Módulo por tração (GPa)	230	390	640
Alongamento por ruptura (%)	1,5-2,1	0,8-1,1	0,3

Fonte: Adaptado de Bertolini (2014).

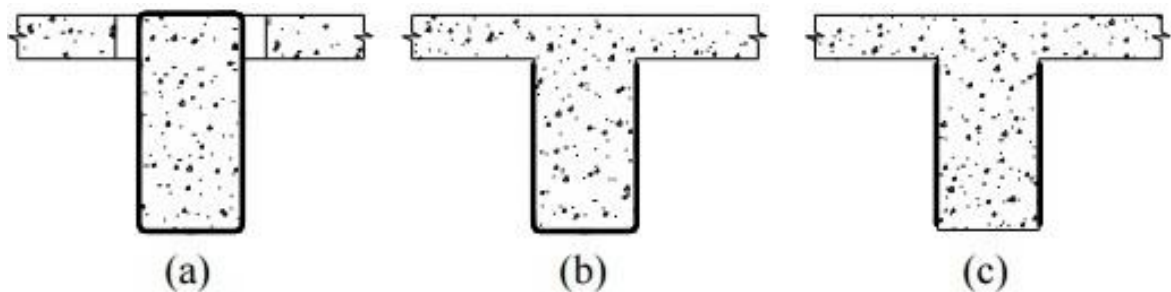
2.1.5. Tipos de reforço

Segundo Machado (2010), em vigas, as fibras de carbono têm como finalidade resistir aos esforços de tração provenientes dos momentos fletores

positivos e negativos, bem como as tensões tangenciais (de cisalhamento) provenientes dos esforços cortantes. Sua disposição pode ser feita tanto na direção de 0° , ou seja, horizontalmente ou em qualquer inclinação irrelevante ($\alpha \neq 0$) quanto na direção de 90° (verticalmente). Assim como as vigas, a aplicação das fibras de carbono nas lajes, pode ser segundo as duas direções.

De modo geral, a resistência ao cisalhamento dos compósitos FRP é muito baixa, no qual o reforço pode ser facilmente cortado com uma serra comum na direção perpendicular ao eixo longitudinal. Para superar esta deficiência, as fibras devem ser orientadas de modo a resistir às cargas aplicadas através da tensão axial (ACI 440R, 1996). Segundo Machado (2010), os compostos com fibras de carbono possibilitam várias alternativas para reforçar as estruturas ao cisalhamento conforme ilustra a Figura 7, sendo o reforço envolvendo total da seção transversal, envolvimento denominado de “U” e envolvimento de duas faces laterais – embora seja a menos eficiente, é a mais indicada em casos de limitação de ancoragem, assim podendo aplicar a fibra apenas nas laterais do elemento.

Figura 7 - Configuração de reforço ao cisalhamento



Fonte: Machado (2010)

As características de cada tipo de reforço, apresentado na Figura 6, são apresentadas abaixo:

- a) Envolvimento total da seção transversal - indicados em casos que não possuem laje na sua face superior ou inferior.
- b) Envolvimento denominado de “U” – envolve três faces do elemento, sendo duas laterais e o fundo. Geralmente é indicado onde há laje em sua face

superior. Esse tipo de composição impede o início de formação de fissuras causadas por tração.

- c) Envolvimento de duas faces laterais – embora seja a menos eficiente, é indicada em casos de limitação de ancoragem, assim podendo aplicar a fibra apenas nas laterais do elemento.

O reforço de flexão deve ser aplicado antes dos reforços de corte ou de confinamento. Essa sequência executiva garante para o reforço à flexão e o reforço ao corte a condição de “colagem crítica”, que é uma aderência íntima entre sistema composto e o concreto. Para o reforço à flexão e o reforço ao confinamento, essa sequência permite a condição de “contato íntimo”, no qual não são obrigatórias as necessidades de aderência entre o concreto e o sistema composto (MACHADO, 2010).

2.1.6. Modos de ruptura

Os modos de ruptura dos compósitos com fibra de carbono fazem referência a casos relatados em análise de trabalhos. Segundo Juvandes (1999), os ensaios com fibra de carbono realizados pelos investigadores do EMPA, cito Kaiser (1989), Deuring (1993) e Meier et al. (1993), conduziram aos seguintes modos de ruptura:

- 1 – Deformação plástica excessiva da armadura longitudinal;
- 2 - Esmagamento do concreto na seção comprimida da viga;
- 3 – Ruptura violenta e brusca na seção mais tracionada do laminado de CFRP. Esta ruptura é precedida por sons crepitantes no reforço e por fissuração e deformações elevadas do concreto;
- 4 – Colapso da viga por cisalhamento;
- 5 – Destacamento do reforço devido a deslizamento do concreto na seção tracionada. Nesta situação ocorre o destacamento antecipado do reforço, de forma

contínua ou brusca, devido a irregularidades na superfície do concreto (a), fissuras de cisalhamento (b) e fissuras de flexão (c).

6 – Efeito “peeling off”, na qual ocorre o destacamento localizado do compósito, a partir de uma zona de ancoragem ou de zonas de fissuração excessiva.

7 – Arrancamento da camada do concreto junto à armadura longitudinal.

De modo geral, estes modos de ruptura podem ser divididos em três categorias, conforme a Quadro 1 (BEBER, 2003).

Quadro 1 - Modos de ruptura

Modos de ruptura	
Ruptura clássica de estrutura de concreto armado submetida à flexão	1 - Deformação plástica excessiva de armadura longitudinal
	2 - Esmagamento do concreto
	3 - Ruptura do reforço à tração
	4 - Colapso da viga por cisalhamento
Destacamento do reforço	5.a - Devido a irregularidades da superfície
	5.b - Devido a fissuras de cisalhamento (sudden peel off)
	5.c - Devido a fissuras de flexão (continuous peel off)
Efeitos de extremidade	6 - Peeling off
	7 - Arrancamento da camada de concreto junto à armadura longitudinal

Fonte: Adaptado de Beber (2003).

Juvandes (1999) complementa dizendo que ainda existe outros modos de ruptura teoricamente possíveis, tais como:

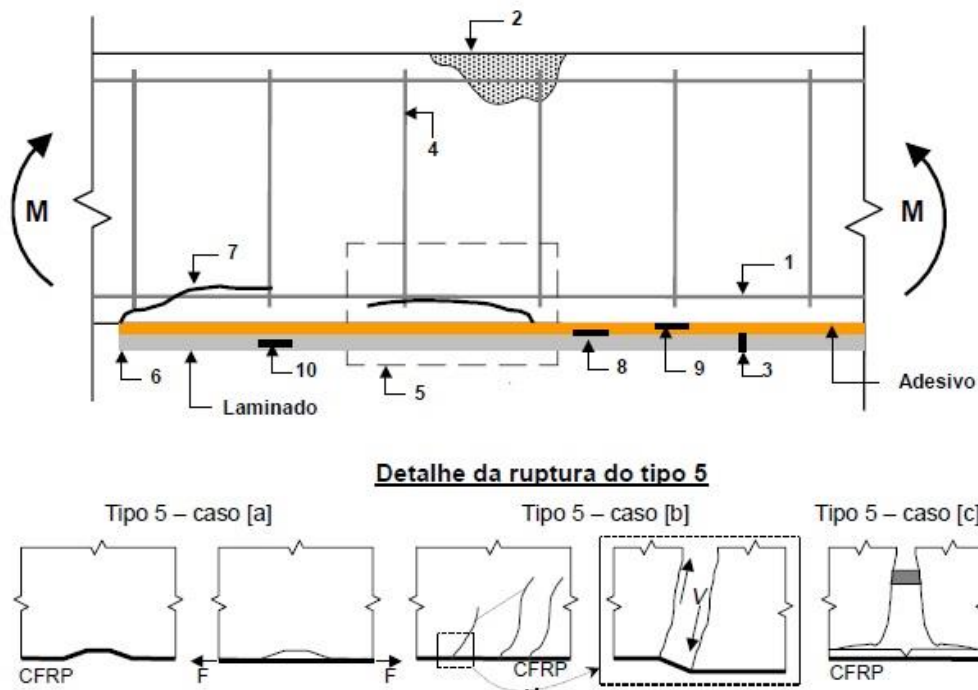
8 – Ruptura do adesivo na interface adesivo-compósito.

9 – Ruptura do adesivo na interface adesivo-concreto.

10 – Cisalhamento interlaminar do compósito.

A Figura 8 esquematiza os modos de ruptura.

Figura 8 - Modos de ruptura



Fonte: Beber (2003)

2.1.7. Limitações da técnica

Uma limitação da técnica de colagem de tecido de fibra de carbono está relacionada com a aderência e a ancoragem destas fibras ao concreto. É limitado o aumento da resistência através da aplicação de fibra de carbono no reforço, sendo que novos tipos de falha manifestam-se por causa da elevada concentração de tensões de cisalhamento nas proximidades dos apoios (BUYUKOZTURK e HEARING, 1997). Beber (2003) define este fenômeno como “peeling off”, que conduz a uma limitação na espessura do reforço, causando uma ruptura frágil sem atingir a máxima resistência e ductilidade. Entretanto, se for executada a ancoragem adicional nas extremidades do reforço, esta situação pode ser resolvida com êxito, conforme indicam as pesquisas de Campagnolo *et al*, (1999).

Outra desvantagem que é apresentada pelos adesivos ao reduzir as características mecânicas em torno de 50°C de temperatura em ambientes secos. A umidade diminui ainda mais esta temperatura, consequentemente, reduzindo ainda mais a adesão ao concreto (Bertolini, 2014). A redução da rigidez e tensão

admissível do reforço são decorrentes da excessiva absorção de umidade pela matriz do compósito, provenientes de alterações nas propriedades do adesivo que podem ocasionar a formação de bolhas nos compósitos (ACI 440R, 1996).

Para Bertolini (2014), a exposição das estruturas à ambientes quentes e úmidos provoca o deslocamento da lamina de reforço, comprometendo a eficiência dos compostos colados ao concreto. Ainda há a falta de normas específicas sobre reforços com fibra de carbono para instruir nas fases de projeto e execução. Somado a isto, há restrições em relação à algumas formas geométricas durante sua aplicação (EMMONS *et al*, 1998b).

2.2. Concretos submetidos às elevadas temperaturas

2.2.1. Elementos do fogo

O fogo é definido pela NBR 13860 (ABNT, 1997) como sendo o processo de combustão caracterizado pela emissão de luz e calor. Também conhecido como combustão, o fogo é caracterizado por um fenômeno químico, no qual o material combustível une-se ao comburente, e impulsionados por uma fonte de calor, iniciam a transformação, resultando na produção de calor e luz, além do desenvolvimento de uma reação em cadeia (CAMILLO JUNIOR, 1999).

Combustível é todo o material capaz de queimar, sendo responsável pela sustentação e pelo alastramento do fogo, conforme cita a NBR 13860 (ABNT,1997). Este material pode ser encontrado no estado sólido, líquido e gasoso. Quando sólido ou líquido, deve ser transformado em gases, para poder ser combinado com o comburente e inflamar (CAMILLO JUNIOR, 1999).

O comburente é definido pela NBR 13860 (ABNT,1997) como sendo o elemento que ativa o fogo e mantém a combustão. O oxigênio é o comburente mais comum, compreendendo 21% da atmosfera terrestre. Quando presente em um ambiente rico em oxigênio, o fogo tem suas chamas aumentadas, gerando mais luz e mais calor. Em ambientes com baixa concentração de oxigênio, cerca de 13%, a

queima torna-se lenta e forma brasas, não havendo mais a formação de chamas (CAMILLO JUNIOR, 1999).

De acordo com a NBR 13860 (ABNT,1997), o calor é a fonte de ignição responsável pelo início da combustão, propagando as chamas pelo combustível. Bretano (2015) define o calor como sendo o responsável pela reação química da combustão gerada pela combinação de gases com o oxigênio.

Por fim, a reação em cadeia é o efeito de uma transformação que acarreta em outra. A reação em cadeia inicia pela geração de gases produzidos pelo aquecimento de materiais e que, combinados com oxigênio, formam uma mistura inflamável. A mistura inflama quando submetida a altas temperaturas, produzindo mais calor que aquece novas partículas do combustível. Essas partículas inflamam-se, gerando maior quantidade de calor e aquecendo outras partículas. Esse processo é contínuo e progressivo sendo denominado de reação em cadeia (CAMILLO JUNIOR, 1999).

2.2.2. Origem e dinâmica dos incêndios

Sob controle, o fogo é extremamente útil, atualmente sendo utilizado amplamente na indústria, nos transportes, na produção de energia e em tantas outras necessidades primordiais ao ser humano. Entretanto, quando foge do controle, o fogo torna-se um agente destruidor. Este sinistro é denominado de incêndio (LIMA, 2001).

Conforme Vargas e Silva (2003), o incêndio apresenta três fases de desenvolvimento, são elas, a fase de ignição, a fase de inflamação generalizada e a fase de resfriamento.

A fase inicial é caracterizada pelo surgimento da ignição inicial e pelas grandes variações de temperatura, decorrentes da inflamação sucessiva dos objetos do local. O fogo inicia num foco e, de modo progressivo, se propaga e aumenta a temperatura do seu entorno. Com o aumento da temperatura, os materiais combustíveis se aquecem e liberam gases e calor, que se acumulam e alastram

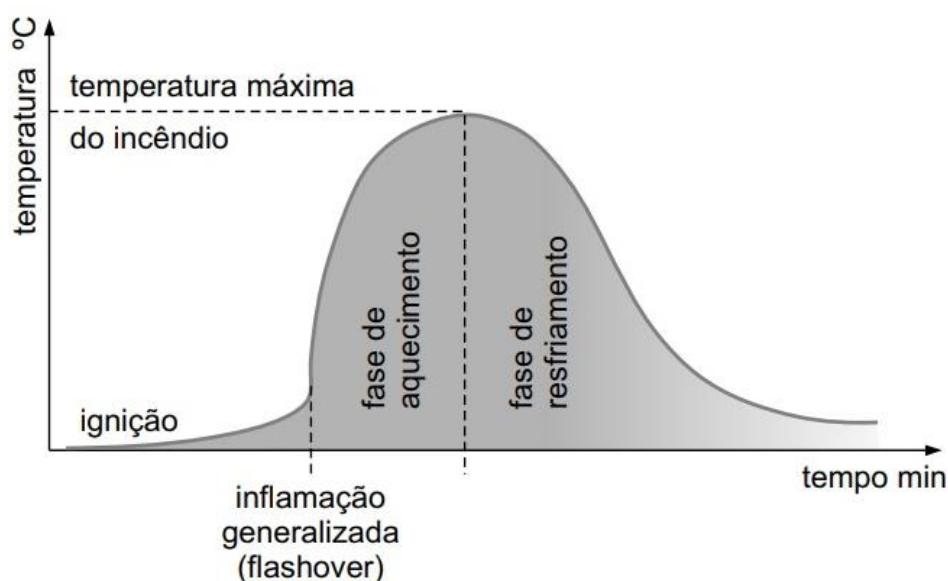
lateralmente junto ao teto, gerando na ignição total do ambiente (BRENTANO, 2015; Silva *et al*, 2010).

Na fase de combustão generalizada ocorre o efeito de convecção, que transmite para os ambientes o ar rico em oxigênio. Os combustíveis presentes no ambiente são aquecidos pelo fogo gradualmente até atingir seu ponto de ignição, produzindo uma queima instantânea e concomitante desses materiais, o que provoca uma explosão, ficando toda a área cercada pelas chamas. Esse acontecimento é conhecido como “Flashover” (PMESP, 1996).

A fase de resfriamento é a etapa final, no qual o consumo total do combustível presente no ambiente ou à falta de oxigênio, provocam a redução da intensidade do incêndio até sua extinção. Esta fase representa a decadência do fogo, com a redução progressiva das chamas até o seu completo desaparecimento, restando brasas, que posteriormente, se transformam em cinzas (BRENTANO, 2015; Silva *et al*, 2010).

Segundo Costa e Silva (2006), a modelagem de um incêndio é feita por meio de curvas temperatura-tempo. Estas curvas associam o crescimento da temperatura em função do tempo de duração do incêndio, estimando a temperatura máxima dos gases quentes no ambiente em chamas (Figura 9).

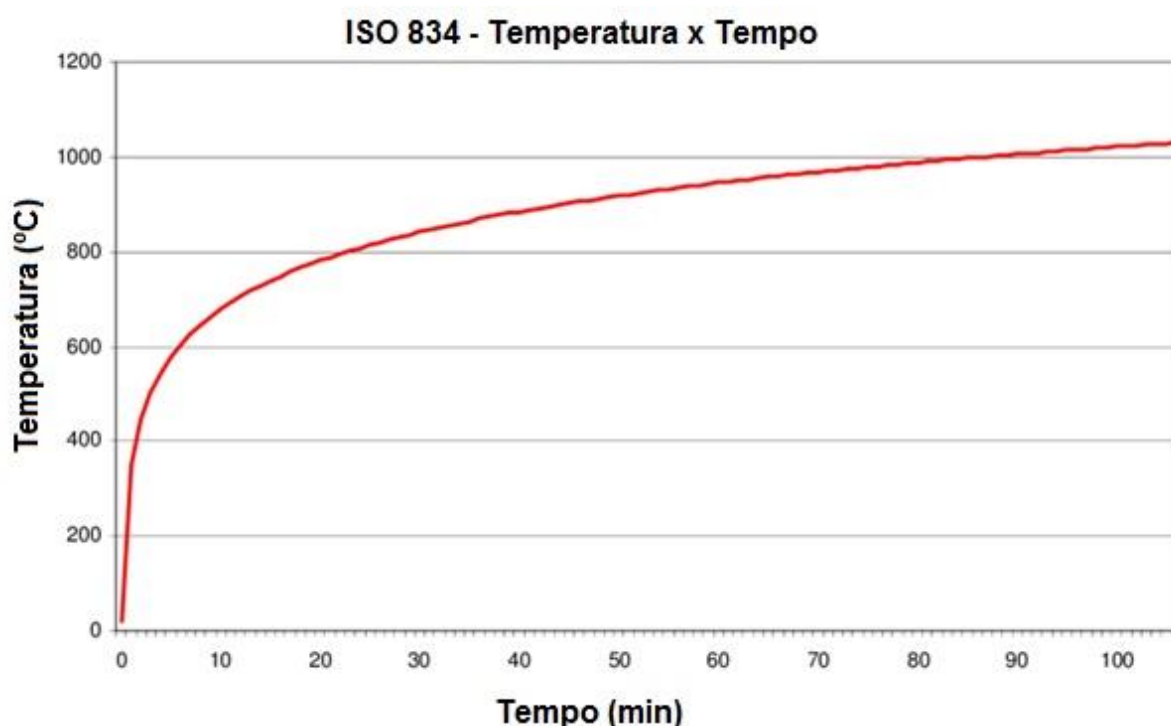
Figura 9 – Curva temperatura - tempo de um incêndio real



Fonte: Vargas e Silva (2003)

Entretanto, a curva temperatura-tempo do incêndio se altera para cada caso estudado. Por este motivo, adotou-se uma curva padrão como modelo para análise experimental de estruturas e materiais de proteção térmica, em fornos. Conhecido como modelo de incêndio-padrão, este modelo é adotado como curva temperatura-tempo dos gases. A curva padronizada mais recomendada e difundida internacionalmente é a da ISO 834 (1994), conforme ilustrada na Figura 10 (COSTA E SILVA, 2006).

Figura 10 – Modelo de incêndio padrão



Fonte: Adaptada pela autora da ISO 834 (1994).

2.2.3. Consequência dos incêndios em edificações

O parâmetro mais importante e determinante do projeto da edificação deve ser a vida humana, de modo que qualquer ambiente, considerado local de risco, possa servir de proteção para o homem. Além disso, o patrimônio é outro parâmetro a ser considerado na proteção contra incêndios, pois os investimentos são altos e as perdas devido a um incêndio também (BRENTANO, 2015).

Para ser considerada segura, a NBR 15200 (ABNT, 2012), preconiza que a estrutura deve apresentar duas funções: a função corta-fogo e a função de suporte. Na função corta-fogo, a estrutura deve garantir o isolamento térmico e ser estanque à passagem das chamas. Já na função de suporte, a estrutura deve evitar o colapso local progressivo ou o colapso global, de modo que consiga manter a sua capacidade de suporte como um todo ou de cada uma de seus elementos.

A NBR 15200 (ABNT, 2012) prevê ainda que o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio deve visar à redução do risco de incêndio, o controle do fogo nas fases iniciais, a elaboração de rotas de evacuação, a restrição da área exposta ao fogo, a operação de combate ao incêndio e a prevenção do colapso prematuro da estrutura.

Os níveis de riscos que uma edificação apresenta em situação de incêndio são determinados pelas características construtivas, como altura, ocupação, área e carga térmica. Cada obra é única, por isso a solução mais adequada contra incêndios deve ser analisada de acordo com suas especificações e particularidades (BRENTANO, 2015).

A resistência ao fogo é definida pela NBR 14432 (ABNT, 2001) como sendo a capacidade que um elemento é capaz de suportar ao ser submetido à ação do fogo, por um período de tempo determinado, garantindo a segurança estrutural, estanqueidade e isolamento. Desta maneira, as estruturas reforçadas também devem resistir ao fogo, permanecendo íntegras durante todo o período requerido de resistência ao fogo da edificação.

Para fins de projeto e dimensionamento de estruturas em situação de incêndio, as estruturas são dimensionadas para resistirem por um tempo mínimo a uma ação padronizada. Esse tempo mínimo é conhecido como Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), que, segundo a NBR 14432 (2001), os elementos construtivos devem resistir ao fogo por um tempo mínimo igual ao especificado em função da ocupação e da altura da edificação. A Tabela 4 mostra as recomendações de TRRF da referida norma, para alguns tipos de ocupações/uso e alturas de edificações.

Tabela 4 - Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

Ocupação/Uso	Altura da edificação (m)				
	Classe P1 $H \leq 6$	Classe P2 $6 < H \leq 12$	Classe P3 $12 < H \leq 23$	Classe P4 $23 < H \leq 30$	Classe P6 $H > 30$
Residência	30	30	60	90	120
Hotel	30	60	60	90	120
Lojas / Supermercado	60	60	60	90	120
Escritório	30	60	60	90	120
Escola	30	30	60	90	120
Shopping	60	60	60	90	120
Igreja	60	60	60	90	120
Hospital	30	60	60	90	120

Fonte: NBR 14432/2001

2.2.4. Consequência dos incêndios nos concretos

A elevada resistência ao fogo é uma das vantagens apresentadas pelos elementos constituintes do concreto, em comparação aos elementos estruturais, principalmente em aço. Embora a capacidade estrutural do concreto submetido a elevadas temperaturas apresente uma redução, o mesmo resiste à ação do calor por um determinado tempo, sem entrar em colapso (Lima *et al.*, 2004).

Segundo Kirchhof (2010), apesar de ser considerado um material resistente ao fogo, a exposição a elevadas temperaturas provoca severas alterações na microestrutura e nas propriedades do concreto. Em temperaturas elevadas ocorrem transformações dos cristais constituintes do concreto, provocando a perda de resistência e rigidez, e ocasionando a deterioração gradativa da pasta de cimento endurecida. A Tabela 5 apresenta as principais modificações originadas nos cristais de concreto.

Tabela 5 – Modificações do concreto em altas temperaturas

Temperatura	Transformação ou reação de decomposição
30 - 120	Evaporação da água livre
30 - 300	Desidratação da água não evaporável ou água quimicamente combinada do gel de cimento
120 - 600	Liberação das águas livre e quimicamente combinada remanescentes
450 - 550	Decomposição do Ca(OH)_2 : $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
570	Transformação do quartzo da forma α para β
600 - 700	Decomposição do CSH e formação de $\beta\text{-C}_2\text{S}$
780	Recristalização das partículas de cimento não hidratadas
600 - 900	Descarbonatação do agregado calcário
1100 - 1200	Derretimento do concreto

Adaptado de Kirchhof (2010).

Quando submetido ao fogo, a deterioração do concreto manifesta-se por meio de rachaduras, estalos (pipocamentos) e até lascamentos, sendo que estes últimos podem ou não ser explosivos (Costa et al, 2002). Segundo Metha e Monteiro (2014), durante um incêndio, a composição do concreto deve ser considerada, devido à pasta de cimento e aos agregados constituintes serem componentes que se decompõem ao calor. A permeabilidade do concreto, o tamanho da componente e a taxa de aumento da temperatura também controlam o desenvolvimento das pressões internas produzidas pelos produtos gasosos de decomposição.

Segundo Costa *et al.* (2002), os produtos de hidratação do cimento Portland comum, permanecem estáveis quimicamente, entre a temperatura de 4°C e 80°C. As alterações na pasta de cimento são essencialmente físicas como porosidade, crescimento de fissuras e energia de superfície. Na temperatura de 65°C e 80°C, a água absorvida pelo concreto endurecido é evaporada e em temperaturas entre 80°C e 100°C, ocorre a evaporação da água livre nos interstícios do concreto. Após

100°C, a água contida nos poros é perdida e gera uma contração da pasta, causando o surgimento de microfissuras. O gel sofre um processo de desidratação a partir de 100°C e intensifica por volta de 300°C. Nesta faixa de temperatura ocorre a perda parcial de adesão química, provocando fissuras e quedas na resistência e no módulo de elasticidade. Em 400°C o processo de desidratação do gel acaba e entre 400°C a 600°C ocorrem grandes reações químicas na pasta, tais como a dessecação dos poros, decomposição dos produtos de hidratação e destruição do gel e reação de desidratação do hidróxido de cálcio.

Cerca de 60 a 80% do volume do concreto é preenchido pelos agregados e, portanto, a variação de suas propriedades durante o aquecimento por influenciar nas características do material. Convém salientar que os agregados constituintes da mistura do concreto são diferentes, não apresentando o mesmo coeficiente de dilatação térmica, causando o aparecimento de expansões internas com diferentes intensidades (Lima et al, 2004).

2.3. Ação de elevadas temperaturas sobre reforços estruturais com fibras de carbono em concretos

Vários compósitos apresentam boas propriedades em elevadas temperaturas, sendo que a grande maioria possui resistência ao fogo, dificultando sua queima. Entretanto, numa estrutura reforçada com fibra de carbono, o aumento da capacidade portante depende do desempenho do adesivo utilizado para o aderir o material compósito ao concreto, que pode ser seriamente comprometido pela ação da temperatura (ACI 440R, 1996).

O efeito da temperatura é crítico nas resinas, pois possuem na sua composição grandes quantidades de carbono e hidrogênio, que são elementos inflamáveis (ACI 440R, 1996). Ao serem submetidas à elevadas temperaturas, as resinas passam por um estado frágil vitrificado. A temperatura que inicia essa transição é denominada temperatura de transição vítrea (T_g), geralmente situada na faixa de 80°C e 100°C. Desta forma, a integridade da estrutura reforçada com fibra de carbono começa sua degradação em temperaturas superiores a T_g , pelo fato da resina não conseguir manter inalterada a adesão das fibras no composto (MACHADO, 2010).

De modo geral, o reforço com composto em estruturas de concreto deve ser utilizado em locais que não excedam a temperatura de transição vítrea da matriz, situada na faixa de 80°C e 90°C. Segundo Machado (2010), a temperatura limite para dimensionamento é considerado 70°C. Em temperaturas superiores à temperatura vítrea da matriz, a eficácia da matriz é prejudicada, reduzindo a capacidade resistente do reforço.

Fortes *et al.* (2002) conclui em seus estudos que houve uma redução de 15% da capacidade resistente dos reforços com fibra de carbono, entre a temperatura de 30°C e 70°C, e uma redução de 30% na faixa de temperatura próxima à 150°C. Com estes resultados, o autor enfatizou que é de suma importância o estabelecimento de um coeficiente de minoração da capacidade resistente do reforço para dimensionar elementos sujeitos às variações de temperatura ou com risco de incêndio.

Devido à suscetibilidade a elevadas temperaturas, as estruturas reforçadas com fibra de carbono devem considerar a ação da ruína do reforço nas combinações, isto é, que suporte as cargas permanentes e uma percentagem de cargas variáveis. Desde a década de 70, recomenda-se que o reforço aplicado em estruturas existentes não ultrapasse 50% da atual resistência e, caso o reforço venha a ruir, a estrutura remanescente deve possuir um fator residual de segurança de aproximadamente 1,2 para evitar sua ruína. (MEIER apud LIMA, 2001).

2.3.1. Medidas de proteção ao fogo no FRP

As medidas de proteção e segurança contra incêndio são classificadas em duas categorias: ativas e passivas. A proteção ativa prevê o uso de meios adequados à segurança dos usuários, devendo ser previstos até no projeto arquitetônico. Essas medidas de proteção têm como finalidade a redução de ocorrência de incêndios graves, por meio da atuação de causas acidentais e da detecção de focos e limitações de meios de propagação (PANNONI, 2002).

Pannoni (2002) cita ainda que as medidas de proteção passiva têm como objetivo a redução do colapso estrutural em casos de incêndios severos. Essas

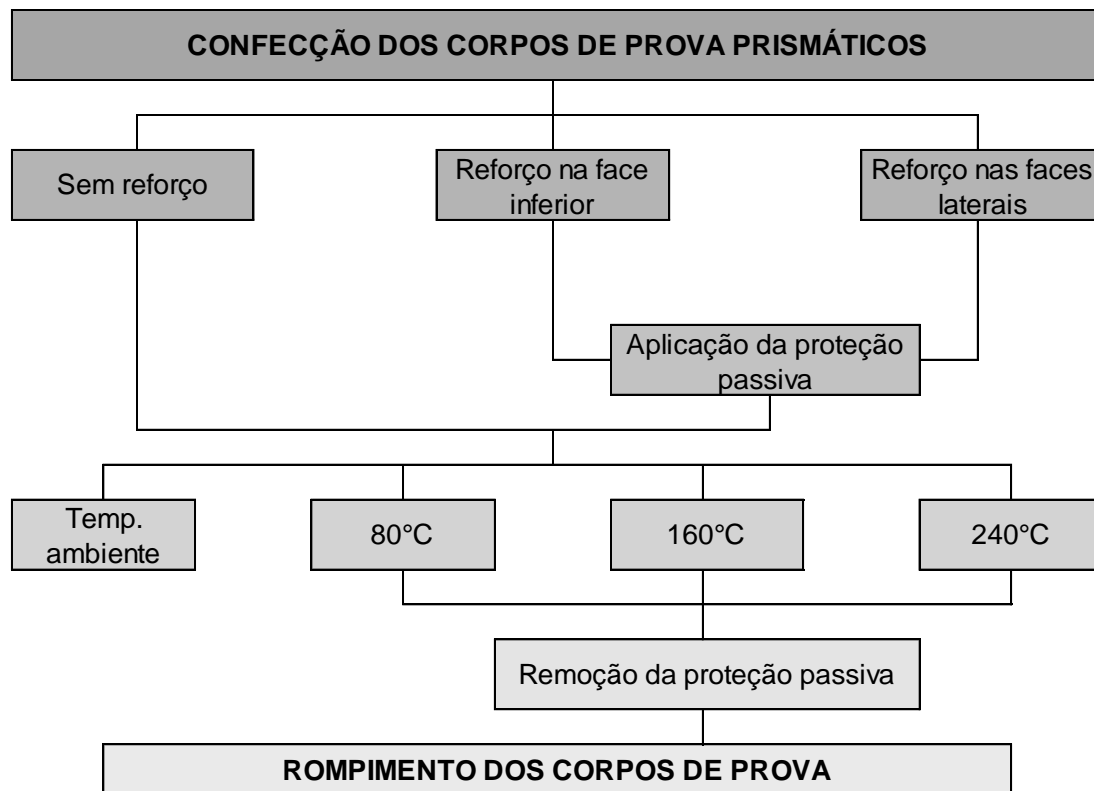
medidas dependem da resistência ao fogo, que compreende a resistência da estrutura, a integridade estrutural perante a ação do fogo e a capacidade de isolamento térmico.

Segundo Lima (2001), para garantir a integridade de um elemento de reforço se faz necessário o seu revestimento, utilizando materiais isolantes e incombustíveis para manter a temperatura baixa por um intervalo de tempo específico. O emprego destes revestimentos tem como objetivo retardar o efeito das temperaturas nos elementos estruturais da edificação. Além disso, a proteção passiva por revestimentos auxilia na evacuação dos ocupantes, quando os locais de evasão são revestidos e protegidos com estes materiais.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo tem por finalidade apresentar a metodologia adotada para analisar o comportamento de corpos de prova de concreto reforçados estruturalmente com compósitos de fibra de carbono submetidos às elevadas temperaturas, ilustrado na Figura 11. São apresentadas as características dos corpos de prova utilizados, bem como de todos os materiais intervenientes e técnicas empregadas na condução do programa experimental do presente trabalho.

Figura 11: Fluxograma para o programa experimental



Fonte: Autora (2017).

3.1. Materiais

Este item descreve os materiais utilizados no programa experimental desta pesquisa. Todos os materiais mencionados neste item são comercializados no Brasil, mais precisamente na região do Vale do Taquari – Rio Grande do Sul. Os ensaios mencionados neste capítulo foram realizados no Laboratório de Tecnologias da Construção – LATEC da Universidade do Vale do Taquari, localizado na cidade de Lajeado – RS.

3.1.1. Cimento Portland

Para a produção de concreto, o aglomerante adotado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), por possibilitar elevada resistência nas fases iniciais, agilizando a realização dos ensaios. As características físicas do cimento, fornecidas pelo fabricante, encontram-se na Tabela 6, cumprindo com as exigências da NBR 5733 (ABNT, 1991).

Tabela 6 - Características físicas do cimento

Ensaio	Valor	Limite (NBR 5733)
Finura (resíduo na peneira 200)	1,20%	6,00%
Tempo de início da pega	3 h 23 min	Superior a 1 hora
Tempo de fim da pega	4 h 46 min	Inferior a 10 horas
Perda ao Fogo	2,24%	4,50%
Resistência à compressão	1 dia - não previsto	1 dia - 14 MPa
	3 dias - 37 MPa	3 dias - 24 MPa
	7 dias - 43 MPa	7 dias - 34 MPa
	28 dias - 51 MPa	28 dias - não previsto

Fonte: Dados do fabricante.

3.1.2. Água de amassamento

A água utilizada para a mistura de concretos foi a proveniente da rede pública de abastecimento de água, da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

3.1.3. Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi optado pela brita natural de origem basáltica do tipo 1, com dimensão delimitada entre 4,80mm a 12,50mm. A caracterização da composição granulométrica foi realizada conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2001), utilizando uma série normal de peneiras, e a determinação da massa específica foi realizada através da NBR NM 53 (ABNT, 2003), sendo que os valores obtidos encontram-se nas Tabelas 7.

Tabela 7 - Resultados de caracterização da brita 1

Peneira (mm)	Percentual retido (%)	Percentual acumulado (%)
31,5	0,00	0,00
25	2,44	2,44
19	44,92	47,36
12,5	39,37	86,73
9,5	8,48	95,21
6,3	4,28	99,48
4,75	0,40	99,88
Fundo	0,12	100,00

Módulo de finura: 7,49

Massa específica (g/cm³): 2,73

Dimensão Máxima Característica (mm): 25

Fonte: Autora (2017).

3.1.4. Agregado miúdo

Como agregado miúdo que foi utilizado é uma areia de tamanho médio e de origem natural, proveniente da região do Vale do Taquari - RS. Para determinar a composição granulométrica, as areias foram coletadas e submetidas ao processo de secagem em estufa, com temperatura entre 100°C e 110°C, evitando que a umidade presente na areia interfira nos resultados, conforme prevê a NBR NM 248 (ABNT, 2002). Para a realização deste ensaio, uma amostra da areia foi colocada sobre uma serie normal de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente conforme estabelece a Norma, e agitadas por um agitador mecânico.

Para determinar a massa específica e a massa específica aparente seguiu-se a NBR NM 52 (ABNT, 2003), que elucida que a massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis, e a massa específica aparente é a relação entre a massa de agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis. Os resultados dos ensaios encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da caracterização da areia média

Peneira (mm)	Percentual retido (%)	Percentual acumulado (%)
9,52	0	0
6,35	0,8	0,8
4,75	2,1	2,9
2,4	6,96	9,86
1,18	8,6	18,46
0,6	9,14	27,6
0,3	28,94	56,54
0,15	41,38	97,92
Fundo	2,08	100

Módulo de finura: 2,14

Massa específica (g/cm³): 2,63

Dimensão Máxima Característica (mm): 4,75

Fonte: Autora (2017).

3.1.5. Aditivo superplastificante

Para melhorar a trabalhabilidade da mistura de concreto foi utilizado o aditivo superplastificante da marca Grace, comercialmente conhecido como “ADVATM CAST 525”. Segundo o fabricante, o aditivo proporciona a produção de concretos com elevada qualidade, melhorando a trabalhabilidade e com baixa relação água/cimento. As características técnicas do aditivo superplastificante, fornecidas pelo fabricante, encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Características técnicas do aditivo

Características técnicas	
Base química	Éter policarboxílico
Aspecto	Líquido
Cor	Amarelo claro
Massa específica	1,16 g/cm ³
Ph	7,3
Teor de cloretos	Não contém cloretos

Fonte: Dados do fabricante

3.1.6. Fibra de carbono

O tecido de fibra de carbono é constituído de uma trama bidirecional de filamentos e são fixados na superfície do elemento com resina epoxídica (Figura 12). O tecido de fibra de carbono utilizado é da marca Redelease e as suas propriedades encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades dos tecidos de fibra de carbono

Propriedade	Valor
Resistência à tração [MPa]	4.500
Módulo de elasticidade [GPa]	240
Densidade [g/cm ³]	1,76
Deformação [%]	1,80

Fonte: Adaptado pela Autora de Redelease.

Figura 12 - Tecido de fibra de carbono



Fonte: Autora (2017).

3.1.7. Resina epoxídica

A resina epoxídica utilizada foi fabricada pela empresa Redelease e tem a finalidade de colar o tecido ao substrato, formando uma matriz do polímero reforçado. Esta resina é proveniente de dois elementos, a resina epóxi e o endurecedor, que devem ser misturados na proporção 2:1, respectivamente (Figura 13).

Figura 13 - Endurecedor e resina epóxi



Fonte: Autora (2017).

A resina epoxídica base do sistema é um produto líquido, resultante da reação da epicloridrina com o bisfenol A. O endurecedor é a base de poliamina modificado, promovendo uma melhor adesão com boa resistência térmica, química e mecânica com baixa exotermia e possuindo boa solubilização na resina com proporções não críticas.

Dentre as vantagens, destacam-se boa fluidez, baixa contração, elevada resistência química, estabilidade aos ciclos térmicos, impactos e ações mecânicas, boa adesão, alta dureza e resistência à abrasão, e, principalmente, fácil impregnação na aplicação de laminados. As propriedades e características da resina encontram-se na Tabela 11, conforme informações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 11 - Características e composições da resina

Propriedades	Valor
Temperatura de utilização [°C]	18 - 30
Tempo de utilização [minutos]	20 – 30
Temperatura de deflexão térmica [°C]	95 – 100
Força de compressão [MPa]	34,47
Força de compressão [MPa]	20,68 - 42,74
Deformação [%]	2,80

Fonte: Adaptado pela autora de Redelease.

3.2. Dosagem

Para a dosagem do concreto utilizou-se como traço inicial 1:2,92:3,08 a/c= 0,45 e 3% aditivo superplastificante, com resistência esperada de 55MPa, conforme Lima (2009). Este traço foi ajustado conforme prescrito no método ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010) de dosagem de acordo com as propriedades dos materiais encontradas. Na tabela 12 encontra-se o traço utilizado para a confecção dos corpos de prova.

Tabela 12 - Traço do concreto

	Cimento	Areia média	Brita 1	Água	Superplastificante
Traço unitário	1	2,92	3,08	0,55	0,5%
Consumo de material (kg/m³)	308,76	901,57	950,97	169,82	1,54

Fonte: Autora (2017).

O concreto para moldagem dos corpos de prova prismáticos foi misturado mecanicamente por uma betoneira de eixo inclinado (Figura 14.(a)) e sua consistência foi controlada através do ensaio de abatimento do tronco de cone (Figura 14.(b)), conforme prevê a NBR NM 67 (ABNT, 1998). O valor médio medido no ensaio foi 12cm, caracterizando um concreto com boa trabalhabilidade.

Para garantir a precisão dimensional dos corpos de prova optou-se por utilizar as fôrmas metálicas com dimensão 15x15x50cm. As mesmas receberam desmoldante para facilitar a desforma, sem danificar os corpos de prova. O concreto foi distribuindo simetricamente no molde com auxílio de uma concha (Figura 14.(c)) e foi adensado manualmente (Figura 14.(d)), em duas camadas, cada uma com 75 golpes, a fim de evitar a ocorrência de ninhos e falhas de concretagem, conforme prevê a NBR 5738 (ABNT, 2015). Após o adensamento foi feito o arrasamento da superfície do molde com auxílio de uma desempenadeira e, posteriormente, os corpos de prova foram identificados (Figura 14.(e)).

Durante o período de cura inicial, os corpos de prova permaneceram num local protegido de intempéries. A remoção das fôrmas ocorreu 48 horas após o término da concretagem e os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida (Figura 14.(f)), para garantir uma hidratação eficaz do cimento.

Figura 14 - Processo de confecção dos corpos de prova: (a) mistura dos materiais; (b) abatimento do concreto; (c) preenchimento do molde; (d) adensamento; (e) identificação; (f) cura em câmara úmida dos corpos de prova



Fonte: Autora (2017).

3.2.1. Controle Tecnológico

A fim de realizar o controle tecnológico e averiguar a resistência dos concretos, em cada concretagem moldaram-se seis corpos de prova cilíndricos com dimensão 10x20cm. Após aplicado desmoldante na fôrma, o concreto foi distribuído dentro do molde em duas camadas, cada uma adensada manualmente com 12 golpes. Decorrido 24 horas após o término da concretagem, as fôrmas foram removidas e os corpos de prova foram identificados e colocados em câmara úmida por 28 dias, conforme prevê a NBR 5738 (ABNT, 2015). A resistência média foi de 46,63 MPa.

3.3. Execução do reforço

O programa experimental do presente trabalho compreende a análise da eficiência do reforço com tecido de fibra de carbono em estruturas de concreto,

quando submetidas à temperaturas acima da ambiente. Para o desenvolvimento do trabalho foram moldados 36 corpos de prova, empregando dois sistemas de reforço distintos. Estes corpos de prova foram divididos em três grupos. O primeiro, denominado Grupo I, totalizando 12 corpos de prova, sem reforço, o segundo, denominado Grupo II, em um total de 12 corpos de prova, reforçados na face inferior, e o terceiro, denominado Grupo III, com 12 corpos de prova, reforçados nas faces laterais, conforme Quadro 2.

O número de corpos de prova foi definido em função da quantidade de patamares de temperatura e do tempo de exposição. Os patamares de temperaturas foram adotados por serem considerados intervalos críticos para as resinas epoxídicas, que iniciam sua volatilização a 80°C e completando-a em 300°C, (LIMA, 2005). Já o tempo de exposição foi determinado de acordo com o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), que prevê a estabilidade estrutural de uma edificação durante um incêndio, previsto pela NBR 14.432 (ABNT, 2001).

Quadro 2 - Metodologia de execução do reforço

Grupo	Quantidade de corpos de prova	Patamares de temperatura	Tempo de exposição	Idade de ensaios
Grupo I - corpo de prova sem reforço	3	Ambiente	0 min	35 dias
	3	80 °C	30 min	
	3	160 °C	60 min	
	3	240 °C	120 min	
Grupo II - corpo de prova reforçado na face inferior	3	Ambiente	0 min	35 dias
	3	80 °C	30 min	
	3	160 °C	60 min	
	3	240 °C	120 min	
Grupo III - corpo de prova reforçado nas faces laterais	3	Ambiente	0 min	35 dias
	3	80 °C	30 min	
	3	160 °C	60 min	
	3	240 °C	120 min	

Fonte: Autora (2017).

Os corpos de prova foram reforçados sete dias após terem sido retirados da câmara úmida e mantidos ao ar livre para reduzir o teor de umidade. A sequência para a execução do reforço com fibra de carbono está ilustrada na Figura 15. O sistema de reforço iniciou pela regularização e correção das imperfeições superficiais do substrato de concreto, com auxílio de uma lixadeira, de modo a

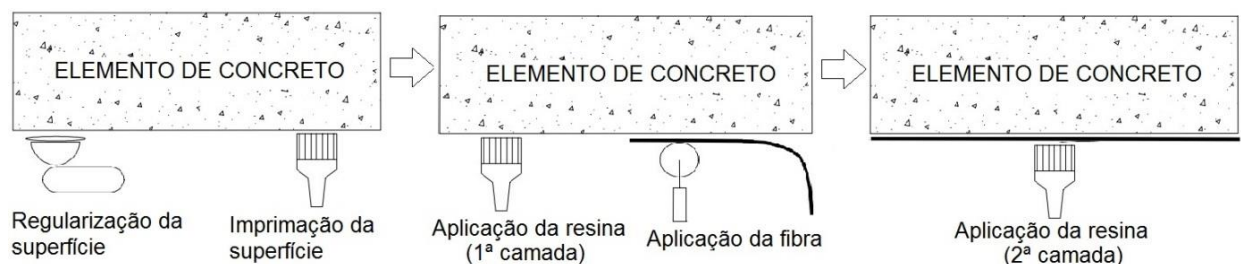
estabelecer um plano adequadamente nivelado e regular, prevenindo o surgimento de imperfeições responsáveis pelo aparecimento de tensões de corte na fibra.

Para calafetar as imperfeições da superfície do substrato de concreto, de modo a torná-lo mais plano, foi realizada a imprimação da superfície com uma mistura epoxídica contendo alto teor de sólidos. Esta imprimação estabeleceu uma película sobre a superfície do concreto, criando uma interface altamente eficiente para a transmissão de esforços entre o composto e a peça de concreto.

O tecido de fibra de carbono foi cortado com auxílio de uma tesoura, na dimensão exata da face a ser reforçada. O procedimento de colagem consistiu na aplicação de uma camada de resina no local a ser reforçado e, imediatamente após, posicionou-se o tecido de fibra de carbono e aplicou-se a segunda camada de resina epóxidica, formando a matriz do elemento compósito.

O tempo de cura da resina, em condições favoráveis, demanda um período de 24 horas para atingir aproximadamente 60% da resistência final. Por depender das condições climáticas e da umidade, optou-se por aguardar um período maior para atingir a cura, estipulado em sete dias.

Figura 15 – Sequência de aplicação do reforço



Fonte: Autora (2017).

Foram adotados dois tipos de reforço, no primeiro as fibras de carbono abrangeram o comprimento total da face inferior (Figura 16) e no segundo envolvem as faces laterais (Figuras 17).

Figura 16 - Reforço aplicado na face inferior



Fonte: Autora (2017).

Figura 17 - Reforço aplicado nas faces laterais



Fonte: Autora (2017).

3.4. Execução da proteção passiva

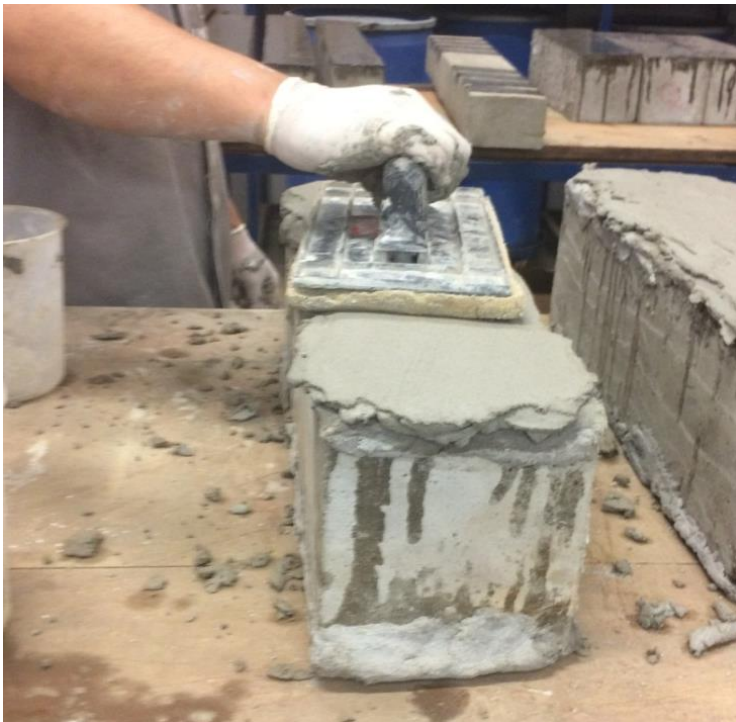
Ao término do período de cura da resina, foi executado sobre o reforço um revestimento de argamassa, com espessura definida em 1,50cm. Este acabamento exerceu a função de proteção passiva, minorando a probabilidade de redução no desempenho do reforço pela volatilização da resina epoxídica.

A proteção passiva aplicada no reforço foi argamassa de revestimento, por se tratar de um material usual nas obras de engenharia civil, sem demandar mão de obra especializada e apresenta um custo inferior em relação aos demais tipos de acabamento.

Para a argamassa aderir ao reforço foi necessária a realização do chapisco. Os materiais utilizados para a execução do chapisco foi cimento Portland pozolânico (CP IV-32) e areia média. O traço adotado foi 1:3, frequentemente utilizado na construção civil, e a aplicação foi de maneira manual com auxílio de uma colher de pedreiro.

A aplicação da argamassa ocorreu 24 horas após a execução do chapisco sobre o reforço dos corpos de prova. Para a realização da argamassa foi utilizado cimento Portland pozolânico (CP IV-32), cal hidratada e areia fina. A razão da mistura dos materiais foi de 1:2:9, traço frequentemente utilizado na construção civil. O processo de execução do revestimento consistiu no lançamento e no desempeno da argamassa (Figura 18).

Figura 18 - Aplicação da proteção passiva



Fonte: Autora (2017).

3.5. Exposição às elevadas temperaturas

A exposição dos corpos de prova ao forno teve como objetivo simular a quantidade de calor que o composto recebe em uma situação de incêndio. Para expor os corpos de prova às elevadas temperaturas foi utilizado um forno mufla elétrico, com capacidade de aquecimento de 16KW, no Laboratório de Processos de Fabricação e Soldagem da Univates, conforme Figura 19.

Figura 19 - Mufla para realização dos ensaios



Fonte: Autora (2017).

A exposição à temperatura ocorreu seis dias após a aplicação da proteção passiva. O forno era aquecido gradativamente, variando o tempo de aquecimento conforme o patamar de temperatura em que os corpos de prova eram expostos. Ao atingir o patamar de temperatura desejado, os corpos de prova permaneciam a uma temperatura constante pelo tempo prescrito no programa experimental. Ao final do tempo de exposição, os corpos de prova foram retirados do forno e expostos ao ar livre para resfriar.

3.6. Determinação da resistência à flexão

No dia seguinte à exposição às elevadas temperaturas, removeu-se a proteção passiva dos corpos de prova e foi determinada a resistência à flexão por 4

pontos, utilizando como parâmetro a NBR 12142 (ABNT, 2010). Este ensaio consistiu na aplicação de forças perpendiculares à face superior e inferior do corpo de prova, por meio de uma prensa hidráulica com capacidade de carga de 2.000kN (Figura 20). O carregamento das forças aplicado nos corpos de prova foi monitorado através de um sistema de aquisição de dados medidos por um computador.

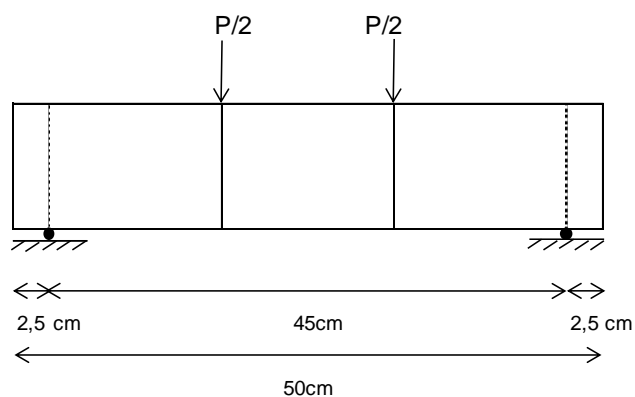
Figura 20 - Ensaio de flexão a 4 pontos



Fonte: Autora (2017).

A Figura 21 ilustra esquematicamente o procedimento de ensaio, o corpo de prova sobre dois apoios de 1ª ordem e a aplicação de duas cargas concentradas de mesma intensidade.

Figura 21 – Ilustração do ensaio de flexão a 4 pontos



Fonte: Autora (2017).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

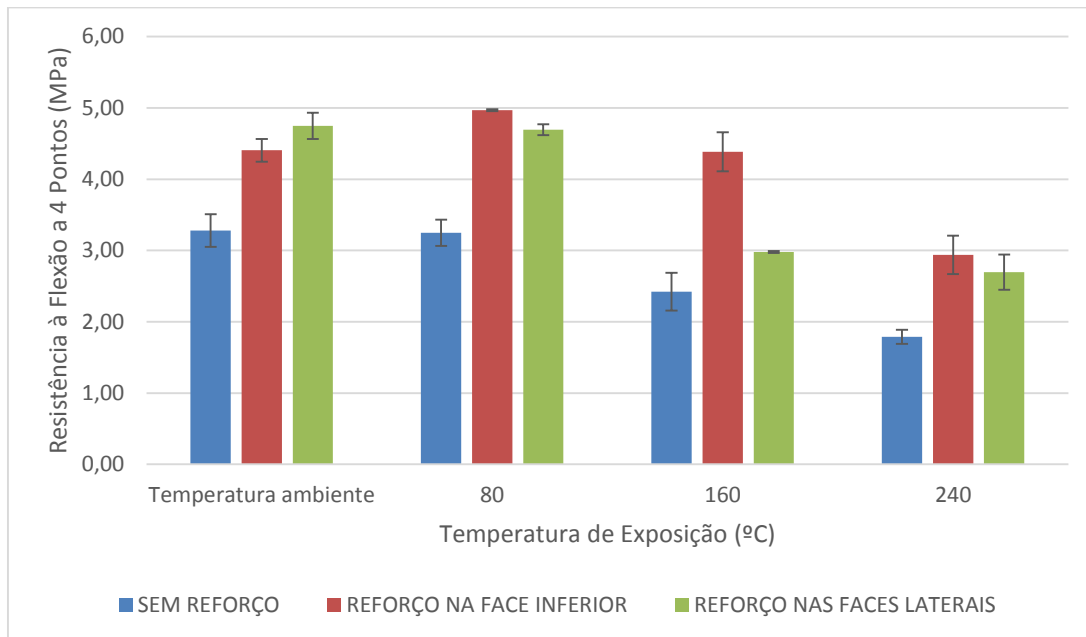
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a execução dos ensaios propostos no programa experimental, buscando atingir o objetivo principal e os objetivos específicos propostos neste estudo. Cabe ressaltar que os resultados passaram por um tratamento espúrio, a fim de eliminar resultados que deixassem o desvio padrão muito elevado, além de desconsiderar os resultados dos corpos de prova que não atenderam os quesitos da NBR 12142 (ABNT, 2010).

4.1. Avaliação da resistência à flexão a quatro pontos

No gráfico 1 são apresentados os resultados do ensaio de flexão com o corpo de prova sem o CFRP (para efeito de parâmetros de referência), e com CFRP (aplicado em duas maneiras distintas, uma na face inferior (4.1.1) e outra nas faces laterais (4.1.2)). Analisando-os em temperatura ambiente e com influência de diferentes temperaturas.

O Gráfico 1 apresenta um estudo comparativo entre os resultados de resistência à flexão a 4 pontos dos corpos de prova referência (sem reforço) e com o reforço com tecido de fibra de carbono. Por meio deste gráfico pode-se observar o decréscimo de resistência conforme o aumento de temperatura.

Gráfico 1: Resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos em diferentes temperaturas dos corpos de prova sem e com CFRP



Fonte: Autora (2017).

No ensaio realizado aos corpos de prova em temperatura ambiente observa-se que a resistência a flexão dos corpos de prova com reforço laterais obtiveram maior valor, com resistência de 4,75MPa, enquanto os corpos de prova com reforço na face inferior e os sem reforços apresentaram os respectivos valores, 4,41 e 3,38MPa.

Na temperatura de 80°C os corpos de prova com reforço na face inferior apresentaram maior valor de resistência, atingindo 4,97MPa, enquanto os corpos de prova com reforço na face lateral e os sem reforços apresentaram os respectivos valores, 4,70 e 3,25MPa.

Em 160°C os comportamentos dos corpos de prova se mantiveram como na temperatura anterior de 80°C, na qual os corpos de prova com reforço na face inferior obtiveram resistência de 4,39MPa, enquanto os corpos de prova com reforço na face lateral e os sem reforços apresentaram os respectivos valores, 2,98 e 2,42MPa.

Na última temperatura analisada, sendo esta 240°C, os corpos de prova sem reforço obtiveram menor valor, de 1,79MPa. Seguindo na ordem crescente das amostras, os corpos de prova com reforço na face inferior e os corpos de prova nas faces laterais apresentaram os respectivos valores, 2,94MPa e 2,70MPa.

Tanto os corpos de prova sem reforço quanto os corpos de prova nas faces laterais seguiram uma sequência de decréscimo de resistência conforme o aumento da temperatura. O mesmo não ocorreu para os reforços na face inferior, onde na temperatura de 80°C houve um aumento de resistência quando comparado à temperatura ambiente, visto que isto possa ter acontecido por algum ruído experimental, este valor pode ser desconsiderado. Somente após a temperatura de 80°C a tendência de decréscimo de resistência ocorreu com o aumento de temperatura.

Conforme observado no estudo de Lima (2001), esta gradativa de redução de resistência à tração com o aumento de temperatura ocorre tanto para os corpos de prova com reforço quanto para os sem reforços. Porém os corpos de prova reforçados com fibra de carbono apresentam pouca variação entre si nas temperaturas iniciais.

Uma análise de cada modelo será apresentada, separadamente, a seguir.

4.1.1. Avaliação de resistência do corpo de prova referência

Os corpos de prova de referência quando submetidos a flexão a 4 pontos demonstraram um decréscimo de resistência em todos os patamares de temperaturas ensaiados, como já observado no Gráfico 1. Na Tabela 13 são apresentados os resultados de resistência à flexão a 4 pontos de cada corpo de prova em cada uma das temperaturas ensaiadas.

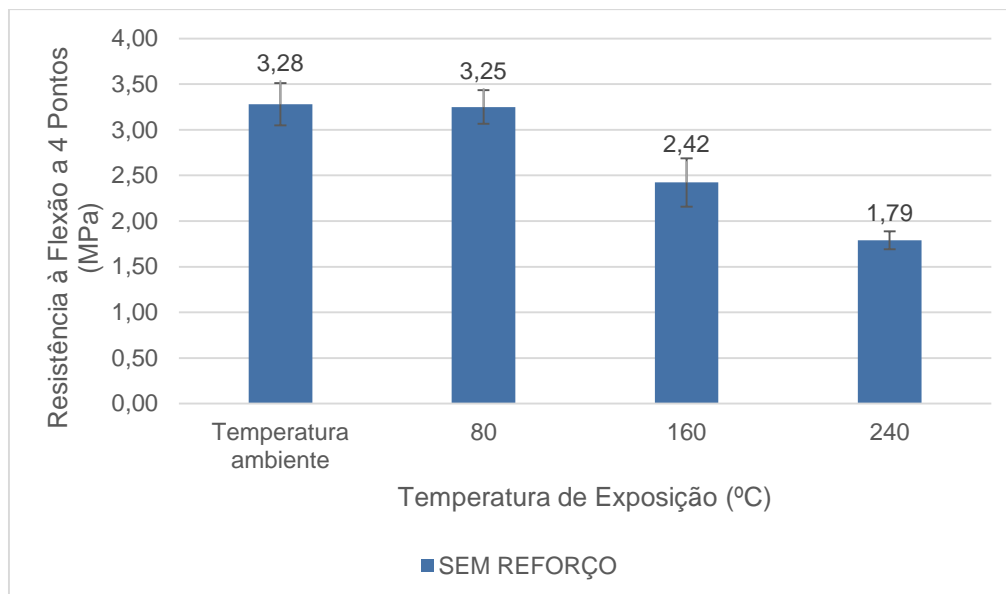
Tabela 13 - Resultados dos corpos de prova sem reforço

Tipo de reforço	Temperatura [°C]	Resistência à flexão [Mpa]	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
Sem reforço	Temperatura ambiente	3,36	3,28	0,23	7,03%
		3,46			
		3,02			
Sem reforço	80	3,38	3,25	0,18	5,66%
		ELIMINADO			
		3,12			
Sem reforço	160	2,17	2,42	0,27	10,97%
		2,4			
		2,7			
Sem reforço	240	1,72	1,79	0,10	5,53%
		ELIMINADO			
		1,86			

Fonte: Autora (2017).

Observa-se no Gráfico 2 que o aumento da exposição em diferentes intervalos de temperatura ocasionou uma redução gradual na resistência à flexão e esta, na maioria dos casos, foi diretamente proporcional ao incremento do tempo de exposição, fato já reportado em Lima (2005) e Kirchhof (2010). Em temperatura ambiente o concreto obteve uma resistência média de 3,28 MPa. Nas demais temperaturas analisadas, 80°C, 160°C e 240°C, a resistência dos corpos de prova decresceu para 3,15Mpa, 2,42Mpa e 2,03Mpa, respectivamente.

Gráfico 2 - Relação da resistência à flexão a 4 pontos e a temperatura de exposição dos corpos de prova sem CFRP

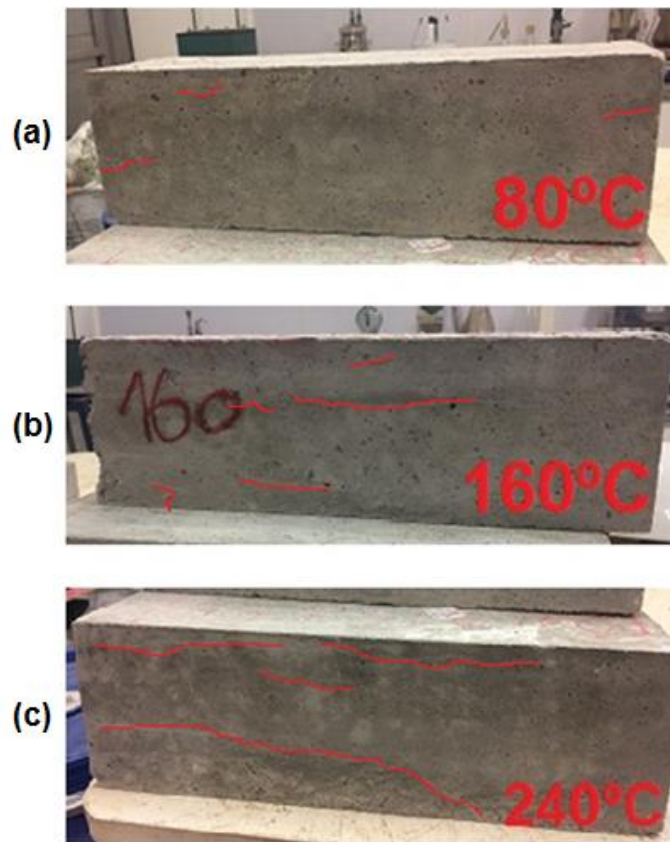


Fonte: Autora (2017).

Mesmo apresentando uma redução da resistência à flexão quando submetido a elevadas temperaturas, o concreto resistiu à ação do calor, por um tempo considerável. De acordo com Lima *et al* (2004), o comportamento do concreto sofreu alterações resultantes da evaporação da água presente na matriz cimentícia, sob a forma livre ou combinada, durante o aquecimento. Isto ocorre devido ao acréscimo de pressão nos poros do concreto ocasionado pela evaporação de água e agravado pelas tensões geradas pelos gradientes de deformações térmicas.

Conforme já mencionado por Kirchof (2010), apesar de ser considerado um material resistente ao fogo, o concreto quando exposto à elevadas temperaturas sofre severas alterações na sua propriedade e na sua microestrutura, podendo ocasionar perda de resistência e rigidez. Estas manifestações surgem por meio de rachaduras, estalos e até lascamentos. Na Figura 22, observa-se os moldes quando submetidos à temperatura de 80°C, 160°C e 240°C.

Figura 22 - Corpos de prova sem reforço (a) 80°C; (b) 160°C; (c) 240°C



Fonte: Autora (2017).

Nota-se através da Figura 22 que houve o surgimento de fissuras com o aumento da temperatura, além dos valores de resistência terem diminuído conforme Gráfico 2. O que comprova a influência de elevadas temperaturas na estrutura dos concretos, principalmente, nas suas propriedades mecânicas.

4.1.2. Avaliação de resistência do corpo de prova reforçado na face inferior

Os corpos de prova reforçados na face inferior demonstraram uma variabilidade nos resultados de resistência à flexão, conforme o patamar de temperatura ensaiado. Na Tabela 14 são apresentados os valores de resistência à flexão a 4 pontos de cada corpo de prova em cada uma das temperaturas ensaiadas, bem como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, destes valores.

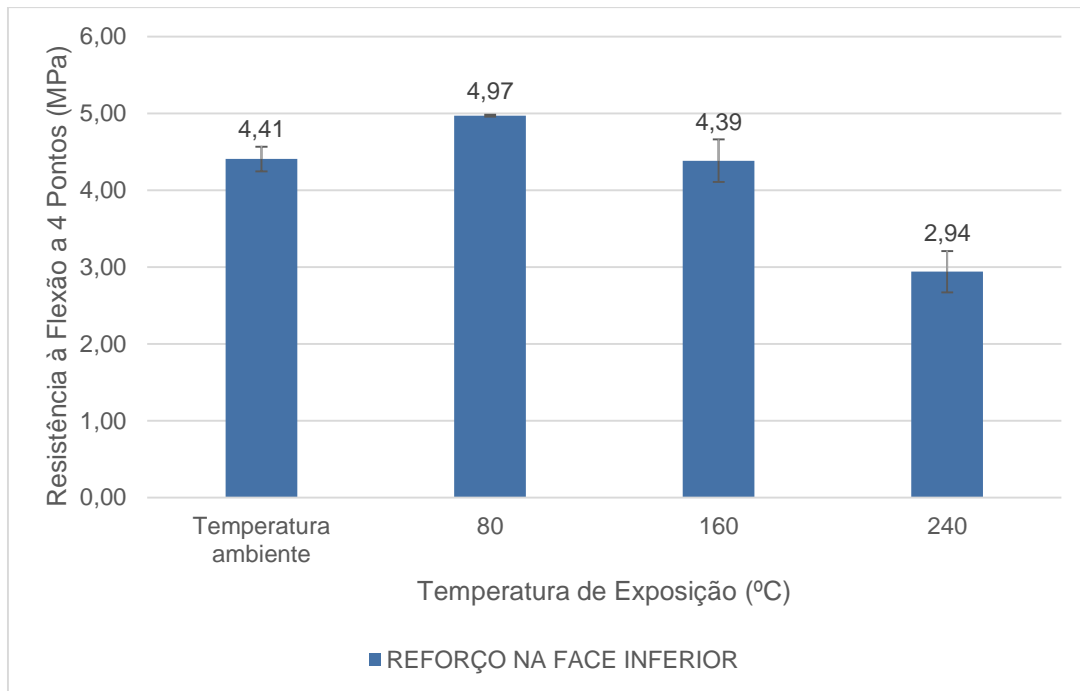
Tabela 14 – Resultados dos corpos de prova reforçados na face inferior

Tipo de reforço	Temperatura [°C]	Resistência à flexão [Mpa]	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
Reforço na face inferior	Temperatura ambiente	4,59	4,41	0,16	3,62%
		4,3			
		4,33			
Reforço na face inferior	80	ELIMINADO	4,97	0,01	0,28%
		4,98			
		4,96			
Reforço na face inferior	160	5,22	4,39	0,28	6,29%
		ELIMINADO			
		4,19			
Reforço na face inferior	240	ELIMINADO	2,94	0,27	9,14%
		2,75			
		3,13			

Fonte: Autora (2017).

O Gráfico 3 apresenta uma relação entre a resistência média dos corpos de prova com reforços aplicados na face inferior de acordo com a temperatura submetida. Por meio do gráfico, nota-se que a resistência dos corpos de prova oscilou conforme a temperatura variava. Na temperatura ambiente (23°C), o concreto reforçado com fibra de carbono nas faces laterais resistiu 4,41MPa. Já nas temperaturas de 80°C e 160°C, a resistência dos corpos de prova aumentou para 5,04MPa e 4,97MPa, respectivamente. Por fim, em 240°C, houve um decréscimo da resistência, alcançando 2,66MPa, sendo a menor resistência dentre as temperaturas analisadas. Nas temperaturas de 80°C e 160°C ocorreu um comportamento atípico, provavelmente mais relacionado a variabilidade experimental do que com a tendência de comportamento diferenciada.

Gráfico 3 - Relação da resistência à flexão a 4 pontos e a temperatura de exposição dos corpos de prova reforçados com CFRP na face inferior



Fonte: Autora (2017).

Como já mencionado para este lote de corpos-de-prova houve uma variabilidade nos resultados, crescendo da temperatura ambiente até 80°C. Entre as temperaturas de 160°C e 240°C, que são posteriores a temperatura de transição vítrea da resina (T_g), o decréscimo de resistência foi maior, demonstrando que o concreto dependeu apenas de sua resistência e o sistema de reforço CFRP foi comprometido, perdendo sua utilidade.

A partir da análise do rompimento dos corpos de prova reforçados com fibra de carbono na face inferior, verificou-se que, todos os corpos de prova apresentaram ruptura por flexão, com fissura vertical, localizada aproximadamente no meio vão das cargas aplicadas (Figura 23).

Figura 23 - Rompimento do corpo de prova reforçado na face inferior



Fonte: Autora (2017).

4.1.3. Avaliação de resistência do corpo de prova reforçado nas faces laterais

Os corpos de prova reforçados nas faces laterais demonstraram decréscimo de resistência à flexão, conforme o patamar de temperatura ensaiado. Na Tabela 15 são apresentados os resultados de resistência à flexão a 4 pontos de cada corpo de prova em cada uma das temperaturas ensaiadas, bem como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, destes valores.

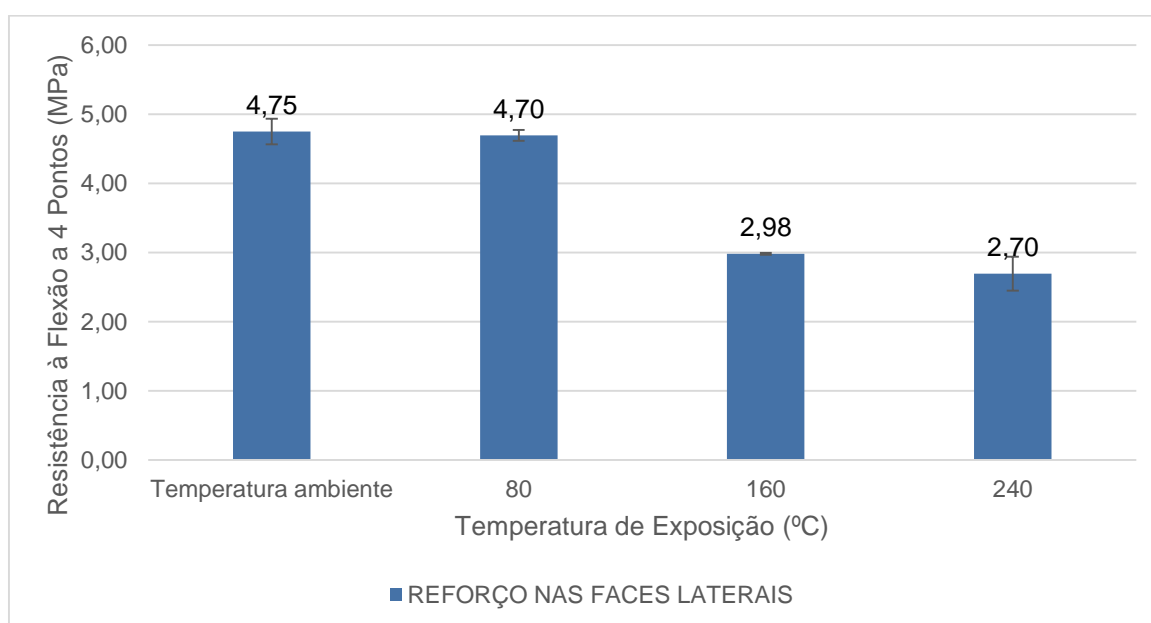
Tabela 15 - Resultados dos corpos de prova reforçados nas faces laterais

Tipo de reforço	Temperatura [°C]	Resistência à flexão [Mpa]	Média	Desvio Padrão	Coef. de variação
Reforço nas faces laterais	Temperatura ambiente	4,88	4,75	0,18	3,87%
		ELIMINADO			
		4,62			
Reforço nas faces laterais	80	4,75	4,70	0,08	1,66%
		ELIMINADO			
		4,64			
Reforço nas faces laterais	160	2,99	2,98	0,01	0,47%
		2,97			
		ELIMINADO			
Reforço nas faces laterais	240	3,06	2,70	0,25	9,18%
		2,52			
		ELIMINADO			

Fonte: Autora (2017).

O Gráfico 4 relaciona a resistência média dos reforços aplicados nas faces laterais de acordo com a temperatura submetida. Observando este gráfico, percebe-se que a resistência dos corpos de prova decresceu com o aumento de temperatura, porém este decréscimo não se manteve constante. Na temperatura ambiente (23°C), o concreto reforçado com fibra de carbono nas faces laterais apresentou a maior resistência quando comparado com as demais temperaturas, alcançado 4,75Mpa. Nas demais temperaturas analisadas, 80°C, 160°C e 240°C, a resistência dos corpos de prova decresceu para 4,70Mpa, 2,98Mpa e 2,70Mpa, respectivamente.

Gráfico 4 - Relação da resistência à flexão a 4 pontos e a temperatura de exposição dos corpos de prova reforçados com CFRP nas faces laterais



Fonte: Autora (2017).

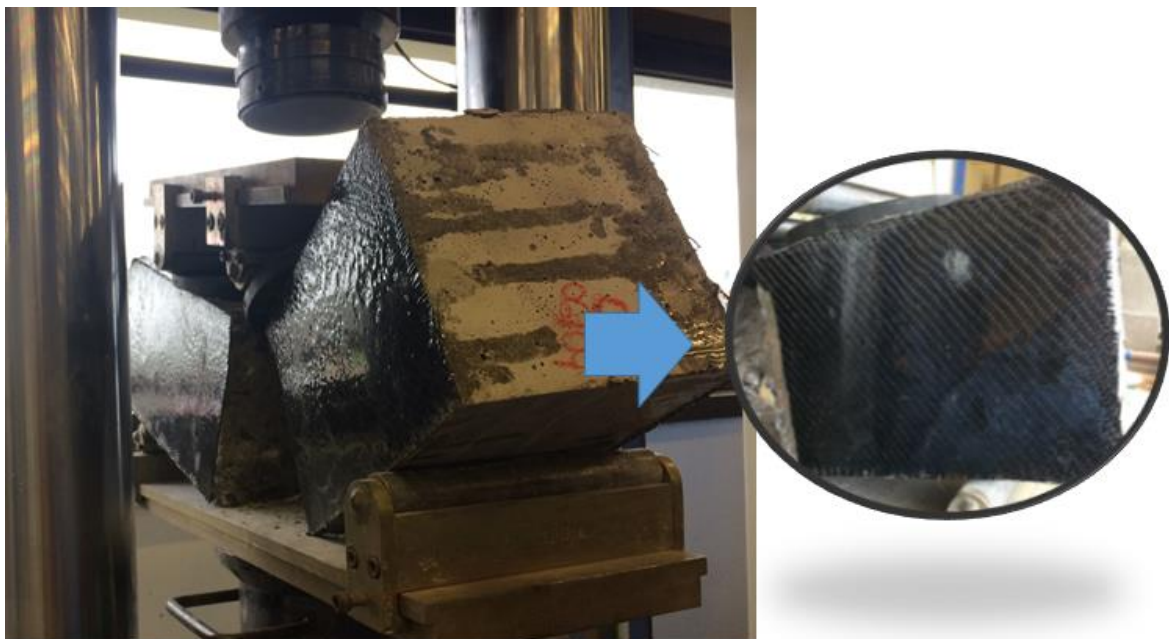
Esse decréscimo de resistência ocorreu devido à deterioração da resina causada pelas elevadas temperaturas. De acordo com Machado (2010), a resina passa para um estado frágil vitrificado quando expostas a altas temperaturas, sendo denominada de temperatura de transição vítrea (T_g) a temperatura na qual inicia esta transição. De modo geral, a T_g das resinas se situa entre 95°C e 110°C (dependendo do fabricante). Em temperaturas superiores a T_g , a resina não

consegue mais manter inalterada a adesão da fibra com o concreto, e assim, o sistema começa a se degradar.

Quando a temperatura foi aumentada de 80°C para 160°C, faixa da T_g da resina, nota-se que o decréscimo da resistência foi maior em comparação com as demais temperaturas analisadas. Em 240°C, temperatura posterior a T_g da resina, o sistema de reforço CFRP se descolou, perdendo sua utilidade e fazendo com que a estrutura dependa, unicamente, de sua resistência, conforme salienta Machado (2010).

Para uma melhor análise do comportamento deste lote de corpos-de-prova se fez necessário avaliar as fotos do rompimento dos corpos de prova reforçado nas faces laterais.

Figura 24 - Rompimento à flexão



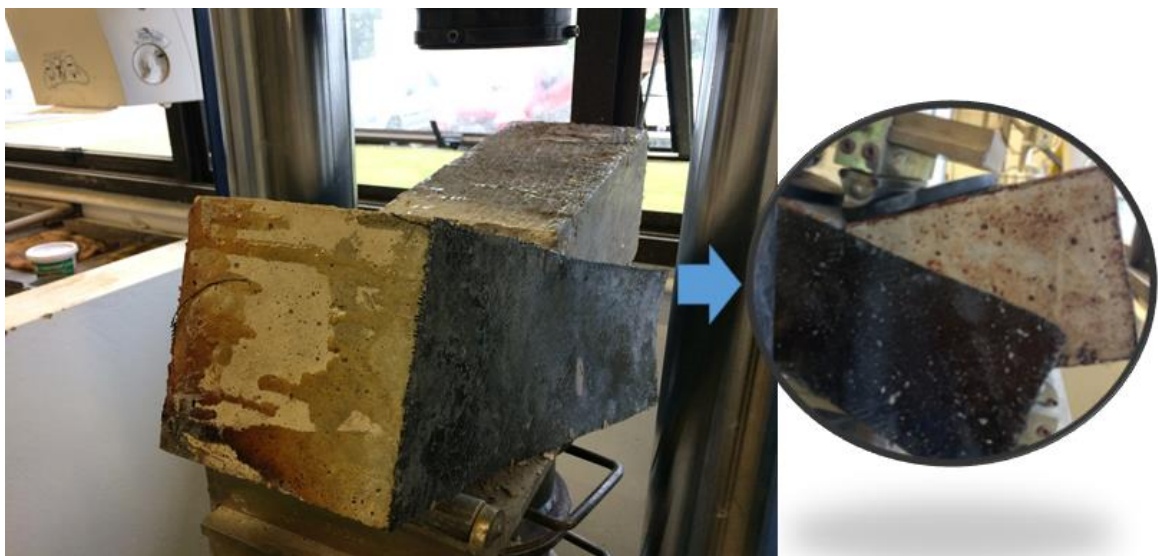
Fonte: Autora (2017).

Figura 25 - Rompimento do corpo de prova com descolamento do reforço



Fonte: Autora (2017).

Figura 26 - Rompimento do corpo de prova com descolamento do reforço



Fonte: Autora (2017).

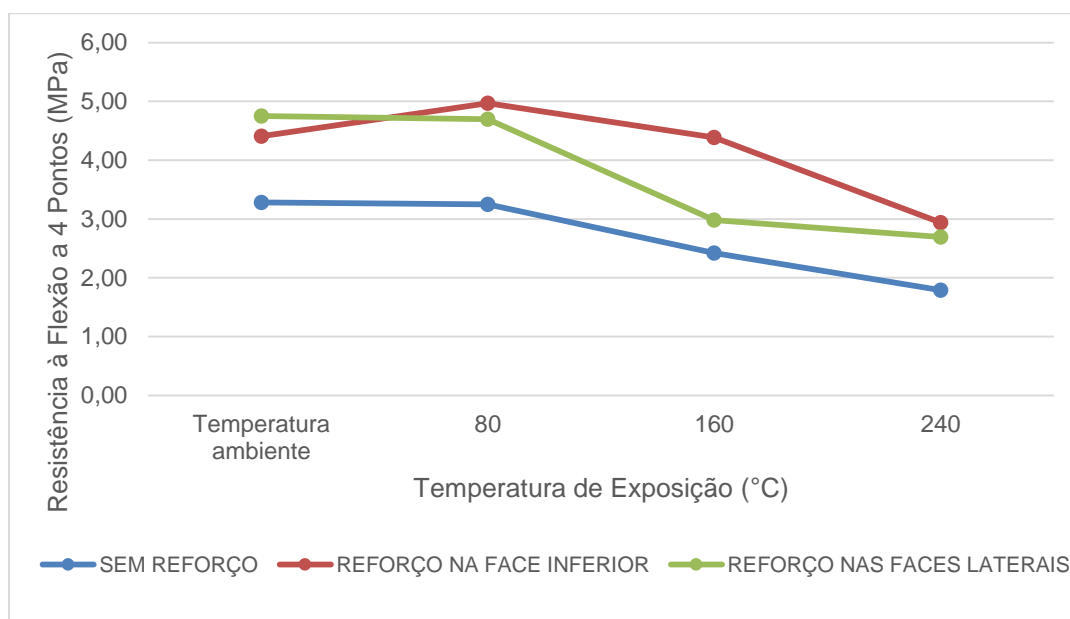
A partir da análise do rompimento dos corpos de prova reforçados com fibra de carbono nas faces laterais, verificou-se que, aproximadamente, 83% dos corpos de prova apresentaram ruptura por flexão, com fissura vertical localizada aproximadamente no meio vão das cargas aplicadas (Figura 24). O restante dos corpos de prova, cerca de 17%, se romperam por flexão com o descolamento do reforço na interface adesivo-compósito, conforme Figura 25 e Figura 26.

O descolamento do compósito ocorreu em dois corpos de prova submetidos à temperatura de 240°C. De acordo com Beber (2003), a ruptura com o descolamento do compósito é conhecida como peeling off, decorrente do efeito conjunto das tensões normais de tração e das tensões de cisalhamento, ocorridas na interface concreto-adesivo-FRP. Este conjunto de tensões provoca o descolando do reforço aplicado no elemento e, subsequente, o rompimento prematuro do corpo de prova.

4.1.4. Comparação entre os dois tipos de reforços utilizados

O Gráfico 5 apresenta um estudo comparativo entre os resultados do ensaio tração na flexão dos corpos de prova referência (sem reforço) com os resultados obtidos dos corpos de prova contendo reforço, um na face inferior e outro nas faces laterais, em patamares de temperatura diferentes. Com este gráfico pode-se observar o aumento da resistência a tração na flexão de ambos os corpos de prova reforçados em comparação aos corpos de prova sem reforço, em todos os patamares de temperaturas analisadas.

Gráfico 5 - Análise da resistência a flexão dos corpos de prova com e sem CFRP



Fonte: Autora (2017).

O reforço na face inferior apresentou melhores resultados nas temperaturas de 80°C e 160°C, decrescendo sua resistência em 240°C. Enquanto o reforço nas faces laterais apresentou um decréscimo de resistência conforme o aumento de temperatura.

É possível crer que na faixa de temperatura da Tg da resina (95°C a 110°C) e nas temperaturas posteriores a esta, ambos os reforços apresentaram decréscimo de resistência, indicando a perda da capacidade resistente do sistema de reforço. De modo geral, com o aumento de temperatura, a resistência os corpos de prova foi se tornando menor, indicando que o reforço vai diminuindo sua colaboração na resistência do conjunto.

Na Tabela 16 é apresentado os incrementos de resistência proporcionados pela fibra de carbono em cada tipo de reforço e em cada temperatura analisada.

Tabela 16 - Incrementos

Tipo de reforço	Temperatura [°C]	Média	Incremento [%]
Sem reforço	Temperatura ambiente	3,28	-
	80	3,15	-
	160	2,42	-
	240	2,03	-
Reforço na face inferior	Temperatura ambiente	4,41	34%
	80	5,04	60%
	160	4,97	105%
	240	2,66	31%
Reforço nas faces laterais	Temperatura ambiente	4,97	52%
	80	4,43	41%
	160	3,46	43%
	240	3,02	49%

Fonte: Autora (2017).

Com base na avaliação do comportamento dos corpos de prova reforçados, tanto na face inferior quanto nas faces laterais, é possível confirmar um aumento de resistência quando utilizado o reforço CFRP à flexão, em todos os patamares de temperaturas ensaiados. Os incrementos em resistência nos corpos de prova reforçados na face inferior são notórios, chegando a atingir até 105%. Já nos corpos de prova reforçados nas faces laterais o incremento máximo alcançou 52%.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente necessidade de reforçar as estruturas de concreto tem exigido o desenvolvimento de novos procedimentos e técnicas eficientes nesta área. Dentre estas técnicas, destaca-se os reforços com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP*), que visam aumentar a resistência das estruturas. Entretanto, o desempenho desta técnica em elevadas temperaturas é de grande preocupação devido à escassez de conhecimento sobre o comportamento do reforço submetido a altas temperaturas. Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento de dois tipos diferentes de reforço submetidos à diferentes patamares de temperatura, bem como colaborar com as pesquisas desta área.

Considerando valores de resistência obtidos através do traço de referência durante o decorrer do programa experimental, foi possível analisar o comportamento deste diferentes reforços quanto a sua resistência à tração na flexão. A partir destas análises demonstra-se que com o aumento de temperatura o decréscimo de resistência torna-se maior, indicando a diminuição da colaboração do reforço na resistência do compósito. Além disso, o efeito da temperatura é crítico na temperatura de transição vítrea da resina e em temperaturas posteriores a esta, na qual o reforço não adere mais ao substrato, consequentemente, comprometendo a capacidade de resistência do reforço.

Por fim, conclui-se que o reforço com fibra de carbono melhorou a capacidade de resistência à flexão, mesmo em elevadas temperaturas, sendo que a técnica de reforço nas faces inferiores apresentou ser mais eficaz quando

comparada a técnica de reforços nas laterais, visto que apresenta melhores resultados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 440. **ACI 440R-96**. State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures, Farmington Hills, Michigan, 1996. 68p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Committee 554. **ACI 544.1R-96**. State of the art report on fiber reinforced concrete, Farmington Hills, Michigan, 1996. 66p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13860**: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

BANDUK, Ragueb Chauki. **Ensino das técnicas de recuperação**. Revista Concreto & Construções - Recuperação estrutural: diagnóstico e terapias para prolongar a vida útil das obras. Ibracon. Ano XXXV. Nº49. Jan.Fev.Mar.-2008. ISSN 1809-7197. p.49-52. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_49.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2017.

BARTON, Richard. **The engineering of adhesives for external reinforcement of bridges and buildings**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. Proceedings ... Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.1, p.277-292.

BEBER, Andriei José. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono**. Porto Alegre, 1999. 108p. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BEBER, Andriei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. Porto Alegre, 2003. 317p. Dissertação de Doutorado em Engenharia - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

BRENTANO, Telmo. **A proteção contra incêndios no projeto de edificações**. 3. ed. Porto Alegre: Telmo Brentano, 2015.

BUYUKOZTURK, Oral; HEARNIG, Brian. **Failure behavior of precracked concrete retrofitted with fiber reinforced plastic laminates**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. Proceedings ... Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.2, p.21-32.

CAMILLO JUNIOR, Abel Batista. **Manual de prevenção e combate a incêndios**. 2. ed. São Paulo: SENAC, 1999.

CAMPAGNOLO, João Luiz; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto; BEBER, Andriei. **Recuperação de estruturas de concreto armado**. Porto Alegre: UFRGS/PPGEC, LEME - Laboratório de Ensaios e modelos Estrutrais, 1999. 34p. (Caderno LEME, 08).

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU'2006 – INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E SUSTENTABILIDADE, 2006, São Paulo. **NUTAU'2006**. São Paulo: NUTAU/FAUUSP, 2006. 1 CD-ROM.

COSTA, C.N.; FIGUEIREDO, A.D.; SILVA, V.P.; **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas**. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (NUTAU). São Paulo, 2002.

DEHN, F.; BEUSHAUSEN, H. D.; ALEXANDER, M. G.; MOYO, P. **Concrete repair, rehabilitation and retrofitting IV**. London,UK: CRC Press/Balkema, 2016.

EMMONS, Peter H. **Concrete repair and maintenance illustrated**.,Kingston, MA, USA: R. S. Means Company Inc., 1994.

EMMONS, Peter; VAYSBURD, Alexandre; THOMAS, Jay. **Strengthening concrete structures, part I**. Concrete International, Detroid, ACI, v.20, n.3, p.53-58, Mar. 1998a.

EMMONS, Peter; VAYSBURD, Alexandre; THOMAS, Jay. **Strengthening concrete structures, part II**. Concrete International, Detroid, ACI, v.20, n.4, p.56-60, Apr. 1998b

FORTES, A.S.; PADARATZJ;I. J.; BARROS, A.O.; FREIRE, I. F. **Eficiência do reforço de CFRP em estruturas de concreto sob efeito térmico**. V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, 5. Anais. São Paulo, 2002.

HARPER, C. A. **Handbook of building materials for fire protection**. Nova York: MacGraw-Hill, 2004.

HELENE, Paulo; BRAGA JUNIOR, Osvaldo. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: Multipla, 2005.

HIGUERO, Victoria Águila. **Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida**. Madrid, 2010. Tese de Mestrado, Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

HOLLAWAY, L. C. **Polymer composites for civil and structural engineering**. Cambridge: Blackie Academic & Professional, 1993.

JANG, Bor. **Advanced polymer composites**. 2.ed. Ohio, USA: ASM International, 1996. 297p.

JUVANDES, Luís Felipe Pereira. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP**. Lisboa, 1999. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

KIRCHHOF, Larissa Degliuomini. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas.** Porto Alegre, 2010. 262p. Dissertação de Doutorado em Engenharia - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. **Investigação dos efeitos de temperaturas elevadas em reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono.** Porto Alegre, 2001. 140p. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P. **Efeito de elevadas temperaturas no concreto.** In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES, 2, 2004, Porto Alegre. Anais...Porto Alegre: UFRGS., 2004.I.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono.** São Paulo: Viapol, 2010. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2017.

MARCELLI, Mauricio. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras.** São Paulo: PINI, 2007.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

PANNONI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio.** 1ª ed. Vol 2. (2002). Disponível em <<http://usuarios.upf.br/~zacarias/protecao.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2017.

PMESP, Corpo de Bombeiros da. **Manual de Fundamentos do Corpo de Bombeiros.** Volumes, v. 1, n. 5, p. 6. São Paulo, 1996.

ROBERY, Peter; INNES, Craig. **Carbon fibre strengthening of concrete structures.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR, 7, 1997, Edinburgh. Proceedings ... Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. 3v. v.1, p.197-208.

SALLABERRY, Roberta Dutra. **Limite de deformação das fibras de carbono usadas no reforço à flexão de vigas de concreto armado.** Rio de Janeiro, 2005. 162p. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, Valdir Pignatta; VARGAS, Mauri Resende; ONO, Rosária. **Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura.** Rio de Janeiro. IABr/CBCA, 2010.

SOUZA, Vicente Custódio de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 2009.

TRANTAFILLOU, Thanasis. **Behaviour of masonry structures strengthened with composites**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE CONSTRUCTION – CONVENTIONAL AND INNOVATIVE, 1997, Innsbruck. Conference report... Zurich:IABSE: ETH_Hönggerberg, 1997, p.729-734.

VARGAS, Mauri Resende; SILVA, Valdir Pignatta. **Resistência ao fogo das estruturas de aço** – Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS / Centro Brasileiro da Construção em aço – CBCA, Rio de Janeiro, 2003. 76p; 29cm.

.

Apêndices

Data	Tipo de reforço	Temperatura [°C]	Fck referência [Mpa]	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
28/ago	REFERÊNCIA	Temperatura ambiente	3,36	3,28	0,23	7,03%
			3,46			
			3,02			
	REFERÊNCIA	80	3,38	3,25	0,18	5,66%
			2,95			
			3,12			
	REFERÊNCIA	160	2,17	2,42	0,27	10,97%
			2,4			
			2,7			
	REFERÊNCIA	240	1,72	1,79	0,10	5,53%
			2,51			
			1,86			
04/set	REFORÇO NA FACE INFERIOR	Temperatura ambiente	4,59	4,41	0,16	3,62%
			4,3			
			4,33			
	REFORÇO NA FACE INFERIOR	80	5,17	4,97	0,01	0,28%
			4,98			
			4,96			
	REFORÇO NA FACE INFERIOR	160	4,58	4,39	0,28	6,29%
			5,49			
			4,19			
	REFORÇO NA FACE INFERIOR	240	2,11	2,94	0,27	9,14%
			2,75			
			3,13			
06/set	REFORÇO NAS FACES LATERAIS	Temperatura ambiente	4,88	4,75	0,18	3,87%
			5,41			
			4,62			
	REFORÇO NAS FACES LATERAIS	80	4,75	4,70	0,08	1,66%
			3,89			
			4,64			
	REFORÇO NAS FACES LATERAIS	160	2,99	2,98	0,01	0,47%
			2,97			
			4,41			
	REFORÇO NAS FACES LATERAIS	240	3,06	3,27	0,29	8,88%
			2,52			
			3,47			



UNIVATES

Rua Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil

CEP 95900-000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714-7000

www.univates.br | 0800 7 07 08 09